

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN ROBOT MÓVIL ENFOCADO A LA
AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN CAMPO ABIERTO PARA LA ELIMINACIÓN
DE MALEZAS EN EL CULTIVO DE PALMA DE ACEITE

JUAN FELIPE VÁSQUEZ VANEGAS

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2020

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN ROBOT MÓVIL ENFOCADO A LA
AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN CAMPO ABIERTO PARA LA ELIMINACIÓN
DE MALEZAS EN EL CULTIVO DE PALMA DE ACEITE

JUAN FELIPE VÁSQUEZ VANEGAS

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO
INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR
CARLOS ANDRÉS MESA MONTOYA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Calificador

Pereira, 03 de julio de 2020

Dedicado a mis padres: Omar Vásquez Morales. y Nury E. Vanegas Jiménez, que incondicionalmente me han apoyado durante toda la carrera para cumplir con este objetivo y me han impulsado a hacer siempre lo mejor que pueda.

A mis amigos Cristian Villa R. y Victoria Izquierdo C. quienes me han ayudado enormemente en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Agradezco al Director de Tesis Carlos A. Mes a M. por su asesoría y acompañamiento.

Finalmente agradezco a todas las personas que de una u otra manera aportaron su grano de arena para poder culminar este proyecto y lograr todos los objetivos que se plantearon.

¡A todos muchas gracias!

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	10
INTRODUCCIÓN	10
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.2. JUSTIFICACIÓN	12
1.3. OBJETIVOS	12
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	12
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO.....	13
CAPÍTULO 2	15
2.1. GENERALIDADES DEL CULTIVO DE LA PALMA DE ACEITE	15
2.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO	17
2.1.2 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS	17
2.1.3 DISTANCIAMIENTOS DE SIEMBRA	18
2.1.4 PLAGAS EN LA AGRICULTURA	19
2.2. ROBOTS MÓVILES	23
2.2.1. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE UN ROBOT	23
2.3. CONFIGURACIÓN DEL ROBOT MÓVIL	26
2.3.1. ACTUADORES.....	26
2.3.2. SENSORES.....	28
2.3.3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN	30
2.3.4. OTROS ELEMENTOS.....	30
CAPÍTULO 3	31
3.1. NECESIDADES DEL ROBOT MÓVIL	31
3.2. LISTA DE MÉTRICAS	33

3.3. MATRIZ NECESIDADES – MÉTRICAS	34
3.4. VIGILANCIA ESTRATÉGICA	36
3.4.1. CAPTACIÓN Y ANÁLISIS DEL ENTORNO	36
3.4.2. PROSPECTIVA	37
3.5. VALORES OBJETIVO IDEAL Y MARGINALMENTE ACEPTABLE	39
CAPÍTULO 4	40
4.1. MÉTODO DE CINCO PASOS	40
4.1.1. ACLARAR EL PROBLEMA	41
4.1.2. BÚSQUEDA EXTERNA DE POSIBLES SOLUCIONES	44
4.1.3. BÚSQUEDA INTERNA DE POSIBLES SOLUCIONES.....	45
4.1.4. EXPLORAR SISTEMÁTICAMENTE.....	45
4.1.4.1. ÁRBOL DE CLASIFICACIÓN	46
4.1.4.2. TABLA DE COMBINACIÓN DE CONCEPTOS	48
4.1.5. GENERACIÓN DE CONCEPTOS	50
CAPÍTULO 5	52
5.1. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DEL CONCEPTO	52
5.2. FILTRADO DE CONCEPTOS	53
5.2.1. PRIMERA MATRIZ DE SELECCIÓN	53
5.2.2. EVALUACIÓN DE LOS CONCEPTOS.....	54
5.2.3. ORDENAR LOS CONCEPTOS.....	55
5.2.4. SEGUNDA MATRIZ DE SELECCIÓN	58
5.2.5. COMBINAR Y MEJORAR LOS CONCEPTOS.....	59
5.2.6. SELECCIÓN DE UNO O MÁS CONCEPTOS.....	60
CONCLUSIONES.....	61
APORTES	62

RECOMENDACIONES	63
REFERENCIAS.....	64
ANEXOS	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Herbicidas usados en las plantaciones de palma de aceite	22
Tabla 3.1. Necesidades del robot móvil y su importancia relativa.	32
Tabla 3.2. Lista de métricas para el robot móvil.	33
Tabla 3.3. Observación y análisis del entorno tecnológico.....	36
Tabla 3.4. Análisis de tendencias de tecnología relacionada al robot móvil.....	38
Tabla 3.5. Valores para definir especificaciones objetivo para el robot móvil	39
Tabla 4.1. Especificaciones objetivo preliminares del robot móvil.....	42
Tabla 4.2. Posibles conceptos para el robot móvil.	50
Tabla 5.1. Conceptos del robot móvil	54
Tabla 5.2. Primera matriz de selección	55
Tabla 5.3. Segunda matriz de selección	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Elaeis Guineensis.....	16
Figura 2.2. Fruto de palma de aceite.....	16
Figura 2.3. Trazado de siembra a tres bolillos.....	18
Figura 2.4. Esquema general del sistema de un robot	24
Figura 2.5. Esquema básico de la estructura de control de un robot móvil	25
Figura 3.1 Matriz necesidades – métricas	35
Figura 4.1. Método de generación de conceptos de cinco pasos.....	41
Figura 4.2. Descomposición funcional (caja negra).....	43
Figura 4.3. Diagrama funcional (caja de cristal).	43
Figura 4.4. Dino de Naïo technologies	44
Figura 4.5. AVO de Ecorobotix.....	45
Figura 4.6. Descomposición del robot móvil.....	46
Figura 4.7. Árboles de clasificación para los diferentes subproblemas	48
Figura 4.8. Tabla de combinación de conceptos	49
Figura 4.9. Posible combinación de conceptos para el robot móvil.....	50
Figura 5.1. Boceto concepto 4.....	56
Figura 5.2. Boceto concepto 7.....	57
Figura 5.3. Boceto concepto 8.....	57
Figura 5.4. Vista superior del concepto final.....	60
Figura 5.5. Render del concepto final.....	60

Capítulo 1

Introducción

INTRODUCCIÓN

El propósito de este proyecto es plantear el diseño conceptual de un robot móvil enfocado en la agricultura de precisión con el fin de exponer una alternativa al combate de malezas.

La agricultura de precisión es la aplicación de la tecnología de la información que ayuda a los agricultores en la gestión del campo de una forma más precisa y eficaz, la agricultura de precisión busca aplicar la cantidad correcta de insumos, en el momento adecuado y en el lugar exacto. Las tecnologías de la agricultura de precisión permiten satisfacer una de las exigencias de la agricultura moderna: el manejo óptimo de grandes extensiones, esta tecnología involucra el uso de sistemas de posicionamiento global (GPS) y de otros medios electrónicos para obtener datos del cultivo.

El cultivo en el cual está basado el proyecto es la palma de aceite, comúnmente llamada corozo, palma africana de aceite o palma aceitera, cuyo nombre científico es *Elaeis Guineensis*. Esta planta es propia de la región tropical calurosa y en Colombia, el cultivo se encuentra en 124 municipios de 20 departamentos alrededor del país.

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El grupo de investigación Procesos de Manufactura y Diseño de Maquina (ProMa&DiMa) de la Facultad de Ingeniería Mecánica se encuentra trabajando en el proyecto “diseño y construcción de un robot móvil capaz de reconocer y eliminar malezas”, este proyecto busca generar una alternativa al combate de malezas el cual involucra el estudio, diseño y análisis de los diferentes sistemas que componen un robot móvil.

El combate de malezas es uno de los programas más grandes y costosos en la agricultura, su objetivo es evitar competencia por nutrientes, luz, agua y facilitar las labores en el campo mediante métodos de combate que no dañen las palmas de aceite ni el suelo. Son consideradas malezas (tales como malas hierbas, plantas arvenses, monte o plantas indeseables) cualquier especie vegetal que interfiera con la actividad humana en áreas cultivables o controladas.

En los cultivos de palma de aceite, las malezas dificultan las labores de fertilización, cosecha y poda, obstruye el paso de los trabajadores y la visibilidad para la supervisión del cultivo. Los primeros años de la palma son los más críticos en los cuales estos sufren más por la competencia de nutrientes y otros factores del medio, retardando el desarrollo de éstos y afectando la productividad por el resto de su vida. Para mejorar la producción de la palma de aceite se genera la necesidad de buscar procesos automatizados de eliminación y control de malezas.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, es necesario estudiar las metodologías asociadas al diseño conceptual, con el propósito de plantear diferentes alternativas para la eliminación de las malezas en cultivos de palma de aceite. El concepto debe de satisfacer los requerimientos de fiabilidad, flexibilidad, durabilidad y adaptación a la agricultura de precisión en campo abierto.

El diseño conceptual es la plataforma base para el diseño de detalle y de los diferentes módulos que se puedan considerar posteriormente en etapas futuras del desarrollo del proyecto.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Con el objeto de generar una alternativa al combate de la maleza y facilitar el proceso de fumigación y extracción de esta, se realizará el diseño conceptual de un robot móvil terrestre mediante las diferentes metodologías de diseño teniendo en cuenta los diferentes sistemas que componen un robot móvil.

La Universidad Tecnológica de Pereira por medio de la vicerrectoría de investigaciones, innovación y extensión desde el semestre 2019-1 se encuentra creando un convenio con Fedepalma y Cenipalma, Este proyecto busca ser una solución de diversos problemas que tiene la palma de aceite en su vida temprana con respecto a las malezas, ya que este tipo de cultivo sufre mucho por la competencia de nutrientes y otros factores del medio, retardando el desarrollo de éstas y afectando su productividad por el resto de su vida; el proyecto permitirá fortalecer los lazos entre Fedepalma, Cenipalma y la Universidad Tecnológica de Pereira generando espacios de intercambio académico, incorporando diferentes áreas del conocimiento de forma colaborativa, permitiendo la participación y aporte constructivo de todos y cada uno de los participantes.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar conceptualmente un robot móvil enfocado a la agricultura de precisión en campo abierto para la eliminación de malezas en el cultivo de palma de aceite.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el tipo de cultivo y terreno para identificar los requerimientos y la configuración del robot móvil terrestre teniendo en cuenta propiedades dimensionales y físicas.
- Definir las especificaciones objetivo con el fin de establecer las propiedades técnicas del robot móvil basándose en el tipo de terreno.

- Crear modelos conceptuales para proponer diferentes configuraciones viables para el combate de maleza.
- Escoger el modelo conceptual que contenga la configuración más adecuada según los diferentes criterios de selección.

1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

En el capítulo 2, se presentará toda la información necesaria para definir los parámetros iniciales del diseño conceptual del robot móvil. Inicialmente, se expone la información característica del cultivo de la palma de aceite, la información técnica del tipo de terreno y los parámetros de siembra. En la segunda parte, se describen los posibles componentes que tendrá el robot móvil. Con esto se da cumplimiento al objetivo específico número uno.

El capítulo 3 expone los procedimientos desarrollados para determinar las necesidades del robot móvil, esto con el objetivo de establecer las métricas con las que se trabajará durante todo el proceso de diseño. También, se realizará un proceso de vigilancia estratégica que permitirá definir las métricas basado en la información encontrada. El objetivo número dos se cumple por medio de las características técnicas definidas anteriormente.

En el capítulo 4, se crearán los diseños conceptuales basados en las necesidades establecidas, también se expone una descripción breve de las características del robot móvil. Por otro lado, se originarán diferentes alternativas viables y se evaluarán las opciones, utilizando un método de cinco pasos propuesto por Ulrich. Este método descompone un problema complejo en subproblemas más sencillos, se realizan conceptos de solución para cada subproblema por medio de búsqueda externa e interna; se utilizan árboles de clasificación y tablas de combinación de conceptos, para explorar de manera sistemática el espacio de conceptos de solución y para integrar las soluciones del subproblema en una solución total.

Lo hecho en este capítulo, genera los diseños conceptuales que satisfacen el objetivo específico número tres.

Por último, en el capítulo 5 se determinará y se evaluará el conjunto de diseños del robot móvil con el propósito de seleccionar el más adecuado y que cumpla con los requerimientos del terreno y del cultivo. Los resultados obtenidos en este capítulo son el producto de las actividades desarrolladas para cumplir con el objetivo número cuatro.

Capítulo 2

Caracterización del cultivo y de los componentes

En el presente capítulo se exponen los conceptos teóricos y la información necesaria para definir los parámetros iniciales del diseño conceptual del robot móvil. En primer lugar, se expone la información característica del cultivo de la palma de aceite, la información técnica del tipo de terreno, los parámetros de siembra y las enfermedades del cultivo. En segundo lugar, se exponen los conceptos teóricos de los robots y los componentes que se aplican en la agricultura de precisión.

2.1. GENERALIDADES DEL CULTIVO DE LA PALMA DE ACEITE

La palma africana de aceite cuyo nombre científico es *Elaeis Guineensis*, es el cultivo oleaginoso que mayor cantidad de aceite produce en el planeta, una hectárea sembrada es capaz de producir entre 6 veces y 10 veces más aceite que los demás cultivos oleaginosos. Colombia es el cuarto productor de palma de aceite en el mundo y el primero a nivel latinoamericano. Actualmente, el cultivo de la palma de aceite se encuentra en 124 municipios de 20 departamentos alrededor del país [6], con 549.355,16 hectáreas sembradas para el año 2018 [7].

Además de su alta productividad, la palma de aceite es importante por la gran variedad de productos que genera, los cuales se usan principalmente en la industria alimenticia. Tanto el aceite de pulpa como el de almendra se utilizan para producir margarina, manteca, grasas para la cocina, jabones, como también se utilizan en la fabricación industrial de otros productos para la alimentación humana.



Figura 2.1. *Elaeis Guineensis*. Tomado de [6]

Por otro lado, el aceite de pulpa se usa en la fabricación de acero inoxidable y aluminio, concentrados minerales, aditivos para lubricantes, biocarburantes y aceites biológicos naturales, se utiliza también en crema para zapatos, tinta de imprenta y velas, en la industria textil y de cuero, en la producción de ácidos grasos y en la producción de vitamina A.



Figura 2.2. Fruto de palma de aceite. Tomado de [8]

El origen de la palma de aceite se ubica en las costas del Golfo de Guinea, en el continente africano, esta se introdujo en el continente americano en 1926 gracias a United Fruit Company que importó a Panamá las primeras semillas de la palma de

aceite desde Malasia. En el año 1945, se establece el primer cultivo comercial en Colombia en la zona bananera del departamento del Magdalena [9].

El tronco de la palma de aceite es de forma cilíndrica, el diámetro es normalmente de 45 cm a 68 cm, la circunferencia es más o menos de 355 cm. La proporción anual de elongación del tronco está entre 35 cm y 75 cm. Con este crecimiento en altura de las palmas, la cosecha de la fruta llega a ser muy difícil después de 15 años [10].

2.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

La palma de aceite es capaz de adaptarse a una gran variedad de suelos, sin embargo, en algunos tipos de suelos se presentan problemas, por ejemplo, en suelos ligeros de textura arenosa, se presentan problemas de lavado y lixiviación de nutrientes debido a que la consistencia del terreno es insuficiente para el soporte de la planta. El cultivo también presenta problemas en suelos pesados de textura arcillosa, éstos se dan por la dificultad para drenarlos y por la facilidad con la que se compactan.

Los suelos apropiados para un mejor desarrollo y rendimiento son los suelos profundos de por lo menos 0,60 m, de textura franco-arcillosa, con buen contenido en materia orgánica y un nivel de fertilidad de medio a alto. Los suelos deben de tener buen drenaje para evitar que se lave el terreno y se presenten problemas de lixiviación de nutrientes. El rango de pH óptimo para el cultivo es de 5 a 6,5, pero es capaz de adaptarse desde 3 hasta 8,2.

La topografía más adecuada es ligeramente plana a semiondulada, ya que los suelos completamente planos necesitan mayores inversiones y esto podría afectar su rentabilidad. El rango adecuado de la pendiente del terreno es de 4 grados a 12 grados.

2.1.2 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

Las condiciones climáticas para un buen desarrollo y un alto rendimiento del cultivo de la palma de aceite son las siguientes:

- Altitud: La altura sobre el nivel del mar no debe ser mayor a 500 msnm.
- Precipitación: De 1.500 mm/año a 1.800 mm/año, entre 120 a 150 mm/mes.
- Temperatura máxima: 33°C.
- Temperatura media: entre 24°C y 26°C.
- Temperatura mínima: 22°C.
- Humedad ambiental: Promedio de 75% de humedad relativa.
- Brillo solar: 1.400 horas/año, 115 horas/mes.
- Radiación solar: De 350 calorías a 360 calorías por centímetro cuadrado por día [11].

2.1.3 DISTANCIAMIENTOS DE SIEMBRA

En el cultivo de la palma de aceite, el sistema de plantación más utilizado es a tresbolillo con distanciamientos de siembra de 9 m entre plantas y 7,8 m entre hileras, proporcionando una densidad óptima de 143 plantas por hectárea, para obtener una mayor densidad se utilizan distanciamientos de 8,5 m entre plantas en el mismo sistema y 7,36 m entre hileras, con el que se obtienen 160 plantas por hectárea. Para facilitar la insolación, las hileras de las palmas siempre deben de estar orientadas de norte a sur.

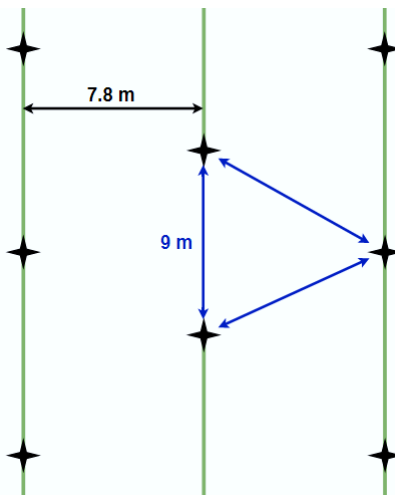


Figura 2.3. Trazado de siembra a tres bolillos

2.1.4 PLAGAS EN LA AGRICULTURA

Se define como plaga cualquier animal, planta o microorganismo que tenga un efecto negativo en la producción agrícola. Las plagas de la palma de aceite se pueden clasificar en insectos, enfermedades, malezas y vertebrados. Generalmente los cultivos que son fuente de alimentos tendrán una mayor concentración de enfermedades o varios tipos de intrusos, debido a esto se crean soluciones inteligentes para el manejo de las plagas.

El Control Integral de Plagas es una estrategia que sirve para identificar las plagas que causan un daño significativo a los cultivos, implementando una gran variedad de métodos de control: físicos, mecánicos, químicos, biológicos, y genéticos. El C.I.P propone herramientas para facilitar la toma de decisiones en el tema de las enfermedades de los cultivos. En Colombia, el Área de Manejo Integrado de Plagas (MIP) de Cenipalma, desde su creación ha trabajado en el conocimiento de la biología y hábitos de los insectos plagas del cultivo de la palma de aceite como una herramienta ligada a la búsqueda de alternativas para su manejo [12].

Normalmente existen varios tipos de problemas en lo que se refiere al control de las plagas como lo son:

- La Resistencia: Ocurre cuando el veneno en la fumigación no liquida completamente las plagas, ya que el abuso en la cantidad y el tiempo de exposición hace que la plaga tolere el tipo de químico y lo elimine de su cuerpo.
- La Resurgencia: Se refiere al incremento de las plagas después de aplicar el químico en el cultivo, debido a que los químicos venenosos no solo matan a los intrusos sino a sus enemigos naturales y como consecuencia aumentan en masa.

Habitualmente para tratar la resistencia de las plagas al químico se debe utilizar con poca frecuencia la fumigación y que sea de menos duración a fin de evitar la evolución de la plaga. De igual forma, la revisión constante del cultivo reducirá el aumento de los intrusos para detectar rápidamente su dureza, por lo tanto, se sabrá si la mezcla del insecticida es eficaz.

2.1.4.1. PRINCIPALES PLAGAS QUE AFECTAN LA PALMA DE ACEITE

Se considera plaga como una aparición masiva y repentina de seres vivos de la misma especie que causan graves daños a poblaciones animales o vegetales siendo; entre las principales se encuentran: el picudo negro (*Rhynchophorus palmarum*) es el principal vector del nematodo *Bursaphelenchus cocophilus* causante de la enfermedad Anillo rojo – Hoja corta se destaca por ser una plaga directa del cultivo de la palma de aceite debido a que estos insectos se alimentan de los tejidos de la palma, las hembras depositan sus huevos en las palmas con Pudrición de Cogollo (PC) o en proceso de descomposición, cuando las larvas emergen se alimentan del tejido blando del cogollo y las bases peciolares impidiendo que la palma se recupere.

El escarabajo *Strategus aloeus* perfora el suelo junto al bulbo de la palma construyendo una galería de hasta 150 cm de profundidad, una vez hecho la galería penetra la parte inferior del bulbo de la palma, donde inicia su alimentación En este proceso el daño al bulbo de las palmas jóvenes (menores de dos años) puede llegar hasta el meristemo y provocar la muerte de la palma.

Los adultos y en especial las larvas de *Demostipa neivai Bondar*, roen la parte superficial de los frutos verdes externos del racimo y el daño de las palmas es ocasionado por las brácteas que cubren los frutos. Un adulto puede consumir entre 150 mm² y 200 mm² por noche. El secamiento consecutivo de la zona atacada de los frutos causa una lignificación gris ceniza del epicarpio dándole una apariencia corchosa. Esto hace difícil la apreciación del grado de madurez del racimo, el cual se pudre en la palma por no ser cosechado o es cosechado verde.

La larva de *Lexotoma elegans* causa defoliaciones a la altura de la corona, aunque prefiere los niveles foliares superiores de la palma, se encuentra hacia el ápice de las hojas. En los primeros instares larvales consume el parénquima foliar haciendo roeduras. En los instares intermedios y finales, consume la lámina foliar en forma irregular.

2.1.4.2. MALEZAS PRESENTES EN EL CULTIVO

Como se mencionó anteriormente, los cultivos de palma de aceite se desarrollan en zonas donde hay abundante calor y humedad, todo esto también favorece el crecimiento de muchas plantas no deseadas. Las malezas más presentes en las plantaciones de palma de aceite son las gramíneas, ciperáceas, malezas de hoja ancha, y los helechos. Entre las malezas más comunes se encuentran *Paspalum conjugatum* Berg., *Ottobachloa nodosa* (Kunth) Dandy, *Ischaemum muticum* L., *Cyperus* spp., *Scleria* spp., *Gleichenia linearis* (Burm.) Clarke, *Eupatorium odoratum* L., *Mikania micrantha* H.B.K., y *Mimosa pudica* L.

El control de malezas en este cultivo se realiza en los callejones y en los círculos alrededor de la planta. En los callejones se recomienda desarrollar cultivos de cobertura utilizando plantas como *Calapogonium*, *Centrosema pubescens*, *Pueraria phaseoloide* o *Desmodium ovalifolium*, estas especies generan una gran masa vegetal que evita el crecimiento de especies no deseadas.

Por otro lado, el control de malezas en los círculos alrededor de la planta se desarrolla de forma manual o de forma química con el uso de herbicidas. Es importante realizar el control de malezas para propiciar la rapidez del crecimiento vegetativo, principalmente en palmeras jóvenes, ya que su sistema radicular en desarrollo sufre mucho si tiene que competir con otras plantas de su entorno. Durante los primeros años, el mantenimiento de los círculos deberá ejecutarse de forma manual, ya que la palma de aceite en este periodo es muy susceptible a los daños por herbicidas, en la edad adulta se puede realizar de forma química.

El control de malezas se debe realizar de forma manual en cultivos de 1 año a 4 años cada 35 días en invierno y 45 días en verano; en plantaciones de más de 5 años se puede realizar cada 60 días [13].

En la siguiente tabla se muestran los herbicidas utilizados en los cultivos de palma de aceite y su respectiva dosis con base al ingrediente activo por hectárea.

Tabla 2.1. Herbicidas usados en las plantaciones de palma de aceite [14]

Herbicida	Dosis (i.a./ha)
Diuron	2 – 3 kg
Glifosato	1,5 – 3,0 kg
Imazapyr	0,38 – 0,56 kg
Metsulfuron-metil	10 – 30 g
Paraquat	Hasta 600 g
Paraquat-díuron	Hasta 2 kg
2, 4-D	1 – 1,5 kg

2.1.4.3. PRINCIPALES ENFERMEDADES DE LA PALMA DE ACEITE

Entre las enfermedades que más afectan la palma de aceite se encuentra la pudrición del cogollo (PC), la marchitez letal (ML) y el anillo rojo (AR).

La Pudrición del cogollo (PC), es una enfermedad causada por *Phytophthora palmivora*, un microorganismo capaz de degradar los tejidos más internos del cogollo y que a su vez permite que otros organismos oportunistas se vinculen a su estado agravando la situación. La PC ataca a las palmas en cualquier edad de manera agresiva y se dispersa rápidamente. Una sola palma enferma y sin tratamiento puede afectar las palmas vecinas y en poco tiempo toda una plantación, debido a que el desarrollo de *Phytophthora palmivora* es favorecido por ambientes húmedos, encharcamientos y la mala fertilización.

La marchitez letal (ML) es una de las enfermedades más limitantes del cultivo de la palma de aceite. El vector causante de la ML es el insecto *Haplaxius crudus* conocido como el Salta hojas de la palma, siendo este un insecto que se encuentra en todas las plantaciones. La propagación de la enfermedad se da cuando un individuo de *H. crudus* llega infectado con el patógeno causante de la ML y transmite la enfermedad a una palma al alimentarse de ella.

El anillo rojo (AR) es una enfermedad de la palma de aceite que es causado por el nematodo *Bursaphelenchus cocophilus*, cuyo vector es el insecto picudo negro, *Rhynchophorus palmarum*. Cuando el Anillo rojo no se detecta a tiempo y no se erradican las palmas enfermas, afecta significativamente las palmas vecinas y, por

ende, la plantación. Se recomienda realizar un trampeo masivo de *R. palmarum* para reducir su población [18].

2.2. ROBOTS MÓVILES

Los robots son máquinas en las que se integran componentes mecánicos, electrónicos, eléctricos y de comunicaciones para un fin específico. Estos también cuentan con un sistema informático que permite su control y programación.

Una de las aplicaciones más importantes de la robótica es la robótica industrial, la cual se encarga principalmente de otorgar flexibilidad a los procesos productivos manteniendo al mismo tiempo la productividad que se consigue con una máquina automática especializada; a su vez la robótica también tiene aplicaciones en la exploración espacial, actividades subacuáticas, manipulación y transporte de materiales peligrosos, minería, agricultura, construcción, entre otros.

El desarrollo de los robots móviles responde a la necesidad de extender el campo de aplicación de la robótica, ya que este estaba restringido inicialmente al alcance de una estructura mecánica anclada en una de sus partes.

Desde el punto de vista de la autonomía, los robots móviles tienen como precedentes los dispositivos electromecánicos, creados para desarrollar funciones inteligentes como descubrir caminos en laberintos, además, el incremento de la capacidad computacional y el desarrollo de nuevos sensores, mecanismos y sistemas de control han permitido aumentar esta.

2.2.1. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE UN ROBOT

El esquema básico de un robot se muestra en la figura 2.4; el sistema mecánico, los actuadores, los sensores y el sistema de control se identifican como los elementos básicos para cerrar la cadena actuación-medidas-actuación.

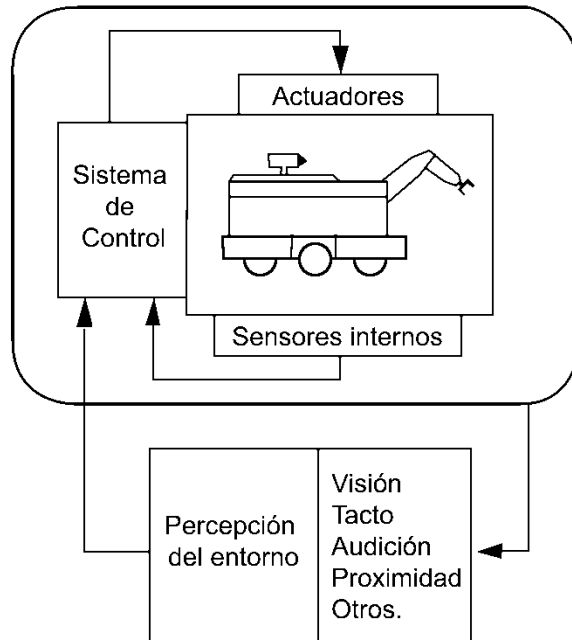


Figura 2.4. Esquema general del sistema de un robot. Adaptado de [19]

En robótica el sistema del procesamiento de la información involucra funciones de control de movimientos, percepción y planificación.

El sistema de control abarca tanto la información suministrada por los sensores internos como la información obtenida del entorno. Los sensores internos miden el estado de la estructura mecánica y en particular, giros o desplazamientos relativos entre articulaciones, velocidades, fuerzas y pares; por otro lado, los sensores externos permiten dotar de sentidos al robot, la información que suministran los sensores externos es utilizada por el sistema de percepción para aprehender la realidad del entorno.

Los sistemas de percepción sensorial hacen posible que un robot pueda adaptar automáticamente su comportamiento en función de las variaciones que se producen en su entorno, haciendo frente a situaciones imprevistas. Para ello el sistema de control del robot incorpora bucles de realimentación sensorial del entorno, generando automáticamente acciones en función de la comparación de dicha información sensorial con patrones de referencia.

Por último, la planificación tiene como objetivo encontrar una trayectoria desde una posición inicial a una posición objetivos, sin colisiones, y minimizando un determinado índice.

En la Figura 2.5 se muestra un esquema básico general de la estructura de control de un robot móvil.

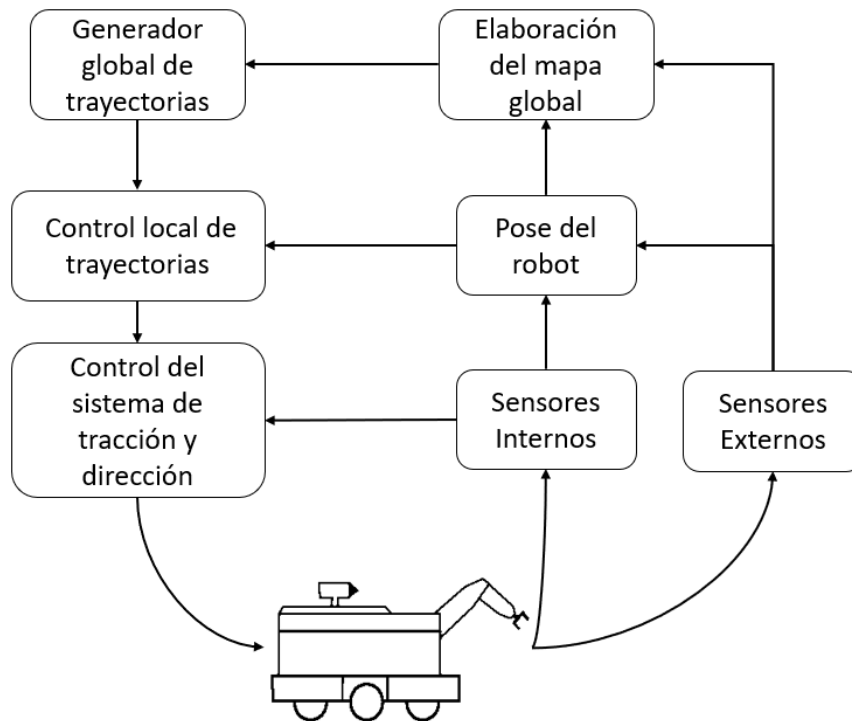


Figura 2.5. Esquema básico de la estructura de control de un robot móvil

Los robots móviles autónomos se caracterizan por tener una conexión inteligente entre las operaciones de percepción y acción, esta define su comportamiento y le permite llegar a la ejecución de las tareas programadas sobre entornos con cierta incertidumbre. El grado de autonomía depende en gran medida de la facultad del robot para abstraer el entorno y convertir la información obtenida en órdenes, de modo que al aplicarlas sobre los actuadores del sistema de locomoción garantice la realización de la tarea. De este modo, las dos grandes características que lo alejan de cualquier otro tipo de vehículo se relacionan a continuación [20]:

- **Percepción:** El robot móvil debe ser capaz de determinar la relación con su entorno de trabajo, mediante el sistema sensorial a bordo. La capacidad de percepción del robot móvil se traduce en la síntesis de toda la información provista por los sensores, con el objeto de generar mapas globales y locales del entorno de acuerdo con los diversos niveles de control.

- **Razonamiento:** El robot móvil debe ser capaz de decidir qué acciones son requeridas en cada momento, según el estado del robot y el de su entorno, para alcanzar su(s) objetivo(s). La capacidad de razonamiento del robot móvil se traduce en la planificación de trayectorias globales seguras y en la habilidad para modificarlas en presencia de obstáculos inesperados (control local de trayectoria) para permitirle, al robot, la consecución de los objetivos encomendados [20].

2.3. CONFIGURACIÓN DEL ROBOT MÓVIL

El primer paso para realizar el proceso de diseño de un robot móvil es identificar su configuración, esto es definir como estarán distribuidos los elementos que lo componen: actuadores, sensores, tipo de alimentación eléctrica, entre otros.

2.3.1. ACTUADORES

Un actuador es un dispositivo mecánico cuya función es suministrar fuerza para mover u operar otro dispositivo mecánico. La fuerza que provoca el actuador proviene de tres fuentes posibles: presión neumática, presión hidráulica, y fuerza motriz eléctrica (motor eléctrico o solenoide), dependiendo del origen de la fuerza el actuador se denomina: neumático, hidráulico o eléctrico

Los actuadores se pueden ser Lineales (pistón) y Rotatorios (motor eléctrico), existen tres tipos de actuadores: Neumáticos, Hidráulicos y Eléctricos.

- **Actuador neumático:** Son los dispositivos que convierten la energía del aire comprimido en trabajo. El rango es mayor que otros, una de las características es la poca viscosidad.
- **Actuador hidráulico:** Los actuadores hidráulicos son los más comunes, estos funcionan a través de fluidos a presión por los que se destacan: cilindro hidráulico, motor hidráulico y motor hidráulico de oscilación.
- **Actuador eléctrico:** Un actuador eléctrico trabaja a través de energía eléctrica como fuente de poder, son los más sencillos de utilizar por su gran cantidad

de componentes y motores según su aplicación. Existen varios tipos: motores de corriente alterna (AC), motores de corriente continua (DC), servomotores y motores paso a paso.

- Motor de corriente continua (DC): Son los más fáciles de controlar, se controlan por inducción y excitación (se crea un campo magnético de dirección fija). Por lo general estos motores tienen mucha velocidad y poco torque, usualmente se utilizan en conjunto con engranajes para reducir la velocidad y aumentar el torque. Al aplicar un voltaje DC el motor empieza a girar, al quitarlo se detiene, si se desea cambiar la dirección de giro del motor se debe de cambiar la polaridad. A diferencia de los servomotores o los motores paso a paso, los motores de corriente continua no pueden ser posicionados en un ángulo específico, estos simplemente giran a máxima velocidad y en el sentido que la alimentación aplicada se lo permite.
- Servomotores: Es un dispositivo pequeño que tiene un eje de rendimiento controlado. Este puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada. Con tal de que una señal codificada exista en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje. Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia. El recorrido del eje de salida es de 180° en la mayoría de ellos, pero puede ser fácilmente modificado para tener un recorrido libre de 360° y actuar, así como un motor.
- Motores paso a paso: Son motores híbridos de imanes permanentes de reluctancia variable. Estos motores son ideales aplicaciones que requieren movimientos muy precisos. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. El paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de $1,8^\circ$. Estos motores pueden quedar fijos en una sola posición o totalmente libres, todo depende si sus bobinas están energizadas.

2.3.2. SENSORES

Un sensor es cualquier dispositivo que permita convertir una magnitud física en una señal eléctrica que, consecutivamente, puede ser utilizado para suministrar información o para ser tratada directamente por un ordenador.

Los sensores internos dan información del estado del robot (velocidad, aceleración, temperatura, entre otros) y los sensores externos dan información de donde se encuentra, distancia a obstáculos y fuerzas aplicadas a objetos del entorno.

Los sensores son los que se utilizarán para determinar la velocidad de avance del robot, la temperatura en un determinado lugar, el estado de cualquiera de sus componentes, así como podrán obtener información del cultivo.

➤ Sensores internos:

- Encoder: Es un dispositivo electromecánico que permite codificar el movimiento mecánico en distintos tipos de impulsos eléctricos: digitales binarias, analógicos en función de una onda, pulsos, entre otros. De este modo.
- Acelerómetro: Es un instrumento capaz de medir aceleraciones.
- Sistema de posicionamiento global (GPS): El GPS es un sistema que permite determinar la posición en tiempo real de cualquier objeto gracias a una red de 24 satélites situados en una órbita a unos 20.200 km de la tierra. La precisión obtenida por el sistema varía entre 5 y 20 metros. El GPS fue inicialmente desarrollado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos al final de la “Guerra Fría” con fines militares. Después de este periodo, se extendió su uso en aplicaciones civiles, comenzando a utilizarse en náutica y aviación. Es indispensable que el robot móvil cuente con un sistema GPS para poder ubicarse en el campo.
- Barómetro: Es un instrumento que permite medir la presión atmosférica. Este instrumento mejora la precisión del GPS.

- Sensor de temperatura: Es un instrumento que sirve para medir la temperatura.
- Sensores externos:
- Sistema de posicionamiento global (GPS): El GPS es un sistema que permite determinar la posición en tiempo real de cualquier objeto gracias a una red de 24 satélites situados en una órbita a unos 20.200 km de la tierra. La precisión obtenida por el sistema varía entre 5 y 20 metros. El GPS fue inicialmente desarrollado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos al final de la “Guerra Fría” con fines militares. Después de este periodo, se extendió su uso en aplicaciones civiles, comenzando a utilizarse en náutica y aviación. Es indispensable que el robot móvil cuente con un sistema GPS para poder ubicarse en el campo.
 - Sensor de proximidad (ultrasonido). El sensor de ultrasonido funciona modificando la distancia de objetos por medio de la detección de ecos ultrasónicos. Las ondas ultrasónicas son capaces de reflejarse por cualquier medio, si llegan a notar alguna discontinuidad.
 - Sensor de proximidad (infrarrojo). El sensor infrarrojo se caracteriza por medir distancia, el cual funciona con un sistema de emisión y recepción de radio lumínica en la cobertura que cubre los infrarrojos. Gracias a las características de los sensores infrarrojos suelen utilizarse en la robótica para medir distancia a corto alcance, estos dispositivos son muy económicos y el tipo de detección es direccional, es decir, solamente detectan objetos que están en frente suyo.
 - Sensores Láser: Sirve para medir distancias, se basa en la medida del tiempo que tarda un pulso de luz emitido en regresar de forma coaxial (por la misma trayectoria). La distancia se podrá calcular dividiendo ese tiempo por dos y multiplicando por la velocidad de la luz.

2.3.3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

En un robot móvil la fuente de alimentación debe de ser suficiente para que este actúe de una manera adecuada durante el tiempo necesario para finalizar cada una de las tareas asignadas. Para asegurar esto, es necesaria la implementación de una fuente de poder constante la cual generalmente es proporcionada por una batería. Una batería convierte la energía química en energía eléctrica.

2.3.4. OTROS ELEMENTOS

- **Redes de comunicación:** Las redes de comunicación son las encargadas de transmitir la información recogida por los sensores ubicados en el robot móvil, desde el lugar donde se encuentra ubicado el robot hasta un lugar donde sea posible procesar la información y tomar decisiones.
- **Microondas:** Las microondas son ondas electromagnéticas, definidas en el rango de frecuencia de entre 300 MHz y 3 GHz, normalmente se utiliza una frecuencia de 2,45 GHz, con una longitud de onda de 122 milímetros. Las microondas pueden ser utilizadas para combatir las malezas, ya que deshidrata las plantas, lo que hace que se marchite y finalmente muera.
- **Lanzallamas agrícola:** Actualmente, en la agricultura se están utilizando diferentes dispositivos lanzallamas, los cuales crean un fuego controlado con el objetivo de eliminar las malezas y plagas que existen en el terreno antes de plantar un nuevo cultivo. La quema es una de las prácticas de control de malezas más antiguas conocidas.

Capítulo 3

Especificaciones objetivo

En este capítulo se establece el conjunto de especificaciones técnicas del robot móvil, éstos explican con detalles precisos y medibles lo que el robot debe de tener para cumplir con sus funciones, también se expone los procedimientos desarrollados para determinar las necesidades, esto con el objetivo de establecer las métricas con las que se trabajará durante todo el proceso de diseño. Asimismo, se realizará un proceso de vigilancia estratégica el cual permite comparar las especificaciones técnicas definidas con otras existentes en el mercado.

3.1. NECESIDADES DEL ROBOT MÓVIL

Para desarrollar correctamente el diseño conceptual del robot móvil es importante identificar las necesidades del proyecto, éstas se establecieron con ayuda del director del trabajo de grado.

Con el fin de establecer la importancia relativa de las necesidades ya definidas, se elaboró una encuesta dirigida al grupo de investigación de la facultad de ingeniería mecánica PROMA&DIMA que contiene un conjunto de enunciados contruidos con las necesidades del robot móvil, se organizaron en una lista jerárquica con valores de importancia para todas las necesidades.

En la encuesta a cada una de las necesidades se le asignó un valor numérico en una escala de 1 a 5; asignando 1 a función indeseable, 2 a función no importante, 3 a función buena mas no necesaria, 4 a función altamente deseable y 5 a función de importancia crítica. En el ANEXO A se presenta la encuesta utilizada para establecer la importancia relativa de las necesidades [1].

Tabla 3.1. Necesidades del robot móvil y su importancia relativa. Adaptado de [1]

Número	Elemento	Necesidad	Importancia
1	Chasis / carrocería	Capacidad para almacenar componentes	3
2	Chasis / carrocería	Protección de los componentes contra el polvo	5
3	Chasis / carrocería	Protección de los componentes contra el agua	5
4	Chasis / carrocería	Fácil acceso a los componentes	4
5	Chasis	Resistente contra golpes	5
6	Chasis	Larga vida útil	5
7	Chasis	Adaptable a mejoras	5
8	Chasis	Robusto pero funcional	3
9	Chasis	Ligero	4
10	Fuente de energía	Eficiencia energética / Ahorro energético	5
11	Fuente de energía	Trabajo continuo	4
12	Fuente de energía	Vehículo autónomo	4
13	Fuente de energía	Recorrido en terreno con pendientes no mayores de 12°	4
14	Ruedas	Recorrido en terreno heterogéneo	5
15	Ruedas	Poco desgaste	4
16	Dirección	Flexibilidad en la trayectoria	4
17	Dirección	Sistema sencillo pero funcional	4
18	Suspensión	Fácil acceso para mantenimiento	5
19	Suspensión	Reducir vibraciones	4
20	Suspensión	Sistema sencillo pero funcional	5

En la tabla 3.1 se encuentra la información relacionada con las necesidades del robot móvil y la importancia relativa de cada una de ellas, esto último es la información recopilada por la encuesta.

3.2. LISTA DE MÉTRICAS

La lista de métricas sirve para describir aspectos importantes acerca del diseño del robot móvil, asimismo para identificar y presentar una solución a las necesidades por medio de un lenguaje técnico; la lista de métricas también se utiliza para dar seguimiento a la solución y mejorar la calidad del producto logrando satisfacer las necesidades del cliente. La medición de este permite además cuantificar tanto el proceso como el producto.

Con la lista de métricas se podrán identificar tendencias importantes, obtener información necesaria para la toma de decisiones e indicadores que conducen a la construcción del robot móvil.

Tabla 3.2. Lista de métricas para el robot móvil. Importancia relativa para cada métrica y las unidades correspondientes. Adaptado de [1]

Núm. Métrica	Núm. Necesidad	Métrica	Importancia	Unidad
1	1, 2, 3, 6, 17, 20	Vida útil	5	Ciclos
2	1	Longitud máxima	3	mm
3	1	Ancho	3	mm
4	1	Altura	3	mm
5	1	Distancia entre ejes	3	mm
6	1	Altura sobre el suelo	3	mm
7	4, 18	Tiempo de ensamble / desensamble	4	h
8	5	Resistencia a la flexión	5	kN
9	6, 15	Análisis vida - esfuerzo	4	N/m ²
10	7	Componentes especiales del robot	5	Subj.
11	8	Rigidez torsional longitudinal	3	kN/m
12	9	Masa total	4	Kg

Continuación tabla 3.2.

13	10, 11	Tiempo de operación	4	h
14	10, 11	Consumo de potencia	4	kW/h
15	10, 11	Tiempo de carga de energía	4	h
16	10, 11	Velocidad máxima de desplazamiento	4	Km/h
17	12	Sistema de radio telemetría + estación de control en tierra	4	Binaria
18	13	Potencia motora	4	W
19	13	Par motor máximo	4	Nm
20	14	Dimensiones de las ruedas	5	Mm
21	16	Radio de giro	4	Mm
22	16	Desplazamiento lateral	4	Mm
23	16	Desplazamiento angular	4	Mm
24	19	Análisis de vibraciones	4	Hz

En la Tabla 3.2 se expresan las necesidades relacionadas a cada métrica, las unidades de medida y una calificación que proporciona la importancia relativa a cada métrica. Las unidades de las métricas se expresan de acuerdo con el sistema internacional de unidades y las métricas subjetivas se abrevian con “Subj.”

3.3. MATRIZ NECESIDADES – MÉTRICAS

La matriz de necesidades – métricas como su nombre lo describe, se utiliza para representar la relación entre las necesidades y las métricas. Las filas de la matriz corresponden a las necesidades del proyecto y las columnas corresponden a las métricas. Las marcas en las celdas de la matriz significan que la necesidad y la métrica asociada a la celda están relacionadas. Esta matriz se utiliza para poder tener una visión objetiva de las características primordiales del robot móvil; esta relación se puede ver en la figura 3.1.

Necesidades		Métricas																							
		Vida útil	Longitud máxima	Ancho	Altura	Distancia entre ejes	Altura sobre el suelo	Tiempo de ensamble / desensamble	Resistencia a la flexión	Análisis vida - esfuerzo	Componentes especiales del robot	Rigidez torsional longitudinal	Masa total	Tiempo de operación	Consumo de potencia	Tiempo de carga de energía	Velocidad máxima de desplazamiento	Sistema de radio telemetría + estación de control en tierra	Potencia motora	Par motor máximo	Dimensiones de las ruedas	Radio de giro	Desplazamiento lateral	Desplazamiento angular	Análisis de vibraciones
1	Capacidad para almacenar componentes	•	•		•	•																			
2	Protección de los componentes contra el polvo	•		•																					
3	Protección de los componentes contra el agua	•																							
4	Fácil acceso a los componentes						•																		
5	Resistente contra golpes							•																	
6	Larga vida útil	•							•																
7	Adaptable a mejoras									•															
8	Robusto pero funcional										•														
9	Ligero											•													
10	Eficiencia energética / Ahorro energético												•	•	•		•								
11	Trabajo continuo												•	•	•		•								
12	Vehículo autónomo																	•							
13	Recorrido en terreno con pendientes no mayores de 12°																	•	•						
14	Recorrido en terreno heterogéneo																			•					
15	Poco desgaste								•																
16	Flexibilidad en la trayectoria																					•	•	•	
17	Sistema sencillo pero funcional	•																							
18	Fácil acceso para mantenimiento					•																			
19	Reduce vibraciones																								•
20	Sistema sencillo pero funcional	•																							

Figura 3.1 Matriz necesidades – métricas. Adaptado de [1]

La utilización de la matriz necesidad – métrica permite:

- Visualizar la relación que hay entre las necesidades y las métricas en la matriz. Sin embargo, son pocas las veces que una sola métrica corresponda a una necesidad, por eso para reflejar por completo una necesidad se emplea varias métricas.
- Conocer los aspectos con menor importancia como lo son: a) la capacidad para almacenar componentes y b) que el chasis sea robusto pero funcional, gracias a la matriz se pudo identificar que esto último corresponde más al tema estético.

3.4. VIGILANCIA ESTRATÉGICA

La vigilancia estratégica es una metodología que permite detectar fuentes de información para analizar y extraer información relevante sobre tendencias, invenciones, aplicaciones, tecnologías emergentes, lo que ayuda a contemplar aspectos de mercado que pueden condicionar el éxito de una innovación. Con el fin de extraer ideas innovadoras que contribuyan al desarrollo del robot móvil, se emplea la metodología CANVAS de vigilancia [24].

Esta metodología se divide en las siguientes etapas:

- Captación y análisis del entorno
- Prospectiva

3.4.1. CAPTACIÓN Y ANÁLISIS DEL ENTORNO

La búsqueda, tratamiento (filtrado, clasificación y análisis) de información de interés con relación al robot móvil se encuentra reflejada en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Observación y análisis del entorno tecnológico

Tema	¿Qué se conoció?	¿Cómo aporta a la solución de la problemática?
Combate de malezas	El control manual sigue siendo el método más usado. Se están desarrollando métodos alternativos como la pulverización de precisión, quema de precisión y deshidratación por medio de microondas.	Los métodos alternativos del combate de maleza buscan un proceso de tecnificación y automatización de los procesos en la agricultura.
Desplazamiento del robot móvil	Uso de llantas convencionales con sistema de dirección independiente en robots móviles para obtener un recorrido libre en el campo.	Permite transitar con facilidad por el campo.
Sistema de locomoción	Los sistemas de locomoción que usan ruedas con dirección independiente están adquiriendo gran avance tecnológico.	Permite desplazamientos con radio de giro pequeños.

Continuación tabla 3.3.

Chasis	Los bastidores son los encargados de proteger partes sensibles, dar sujeción a los componentes mecánicos, cumplir con la función de absorción de impactos y evitar la deformación.	Es necesario elegir o diseñar un chasis que cumpla con características como resistencia y ligereza, para soportar elementos mecánicos y diferentes sistemas secundarios que permitan el funcionamiento del robot.
Sistema de alimentación	Garantiza la autonomía del robot, dado que al ser móvil no va a poder estar conectado a una fuente de energía, sólo contará con las reservas internas que pueda transportar.	Una mayor eficiencia en el consumo de energía y se establecen las prioridades de alimentación.
Sistema de suspensión	Es el sistema encargado de absorber las vibraciones y movimientos provocados por las ruedas al desplazarse por el terreno no uniforme. Existe gran avance tecnológico con diferentes configuraciones para este sistema.	Es necesario seleccionar un sistema de suspensión para evitar daños en los elementos del robot ocasionados por el terreno.

3.4.2. PROSPECTIVA

La prospectiva es una metodología utilizada para:

- Conocer mejor la situación presente.
- Identificar tendencias futuras.
- Anticipar el comportamiento del mercado.
- Analizar el entorno tecnológico.

Para el desarrollo de esta metodología se hace un análisis de tendencia con el fin de recolectar información sobre el comportamiento de una variable a lo largo del tiempo y su proyección a futuro (ver Tabla 3.4).

Los desarrollos tecnológicos alrededor de los robots móviles enfocados en la agricultura de precisión están dirigidos principalmente en la versatilidad y autoadaptabilidad; la primera abarca la ejecución de diversas tareas asociadas a la

fumigación y control de malezas, y la segunda la capacidad de cumplir su objetivo a pesar de las perturbaciones imprevistas del entorno, esto con ayuda de sensores. También cabe destacar el avance tecnológico constante en cuanto a la toma de datos en el campo e identificación de plantas con mayor precisión. En la agroindustria la tecnología móvil es utilizada con el propósito de mejorar la productividad agrícola, disminuir el impacto ambiental y reducir costos.

Tabla 3.4. Análisis de tendencias de tecnología relacionada al robot móvil

Análisis de tendencia				
Tecnología: Robots agrícolas				
¿El uso de esta tecnología para la solución de la problemática está estable, aumentando o disminuyendo?				
Tema / Tendencia	Tendencia			Razón
	=	↑	↓	
Eficacia		✓		Aumentar la productividad agrícola.
Autonomía		✓		Reducir costos.
Tecnología: Diseño estructural				
¿El uso de esta tecnología para la solución de la problemática está estable, aumentando o disminuyendo?				
Tema / Tendencia	Tendencia			Razón
	=	↑	↓	
Chasis		✓		Materiales livianos y alta resistencia mecánica.
Tecnología: Sistema operacional				
¿El uso de esta tecnología para la solución de la problemática está estable, aumentando o disminuyendo?				
Tema / Tendencia	Tendencia			Razón
	=	↑	↓	
Sensorial		✓		Recolección de datos más precisos en el campo.
		✓		Identificación automática de malezas.
Fuente de alimentación		✓		Uso de energías renovables.
		✓		Consumo óptimo y ahorro de energía.
Autonomía		✓		Eficiencia energética y uso racional de energía.
Control		✓		Programación de recorrido y ejecución de tareas.

3.5. VALORES OBJETIVO IDEAL Y MARGINALMENTE ACEPTABLE

Para establecer valores objetivo, se considera la información del cultivo, la vigilancia estratégica y la capacidad futura de productos de la competencia. Del resultado de la vigilancia estrategia se encontraron un rango de valores los cuales son sacados de proyectos en desarrollo o hacen parte de productos ya puestos en el mercado; para otras métricas no fue posible determinar un rango ya que la información es reservada por las empresas o proyectos. En la Tabla 3.5 se muestran las métricas obtenidas por este proceso.

Tabla 3.5. Valores para definir especificaciones objetivo para el robot móvil

Núm.	Métrica	Unidad	Valor marginal	Valor ideal
1	Longitud	mm	2000 – 3750	2000 – 2500
2	Ancho	mm	1000 – 3000	2000
3	Altura	mm	1300 – 1400	1300
4	Número de ruedas	Cantidad	4	4
5	Peso sin componentes	kg	600 – 800	600
6	Autonomía	h	8	>8
7	Velocidad máxima	km/h	3,6 - 4	3 – 4

Identificar los requerimientos para el robot móvil es una parte integral dentro del proceso de diseño ya que son útiles para guiar las subsiguientes etapas de generación de conceptos.

Capítulo 4

Diseños conceptuales

El proceso de diseño conceptual consiste esencialmente en obtener las posibles soluciones al problema planteado a partir de las especificaciones, requisitos y necesidades definidas anteriormente. Un concepto es una descripción aproximada de las características del producto, donde está definida la forma, la tecnología y algunas especificaciones técnicas. El concepto puede ser representado por un esquema acompañado de textos abstractos que detallen algunas particularidades del diseño. El éxito del producto depende en gran medida de la calidad del diseño conceptual.

Este capítulo presenta el proceso para generar los conceptos del robot móvil, iniciando con el conjunto de necesidades y las especificaciones objetivos definidas en los capítulos anteriores, todo esto permitirá crear un conjunto de alternativas para las diferentes funciones y seleccionar las opciones más adecuadas.

4.1. MÉTODO DE CINCO PASOS

La metodología de cinco pasos propuesta por Ulrich permite la exploración completa del espacio de diseño y reduce la probabilidad de descuidar aspectos significativos en la solución de los conceptos considerados, descomponiendo un problema complejo en subproblemas más sencillos. Los conceptos de solución se realizan

para cada subproblema por medio de procedimientos de búsqueda externa e interna; también se utilizan árboles de clasificación y tablas de combinación de conceptos, para explorar de manera sistemática el espacio de conceptos de solución y para integrar las soluciones del subproblema en una solución global. Por último, se reflexiona en la validez y aplicabilidad tanto de los resultados obtenidos como del proceso desarrollado.

La figura 4.1 representa la metodología de cinco pasos propuesta por Ulrich.

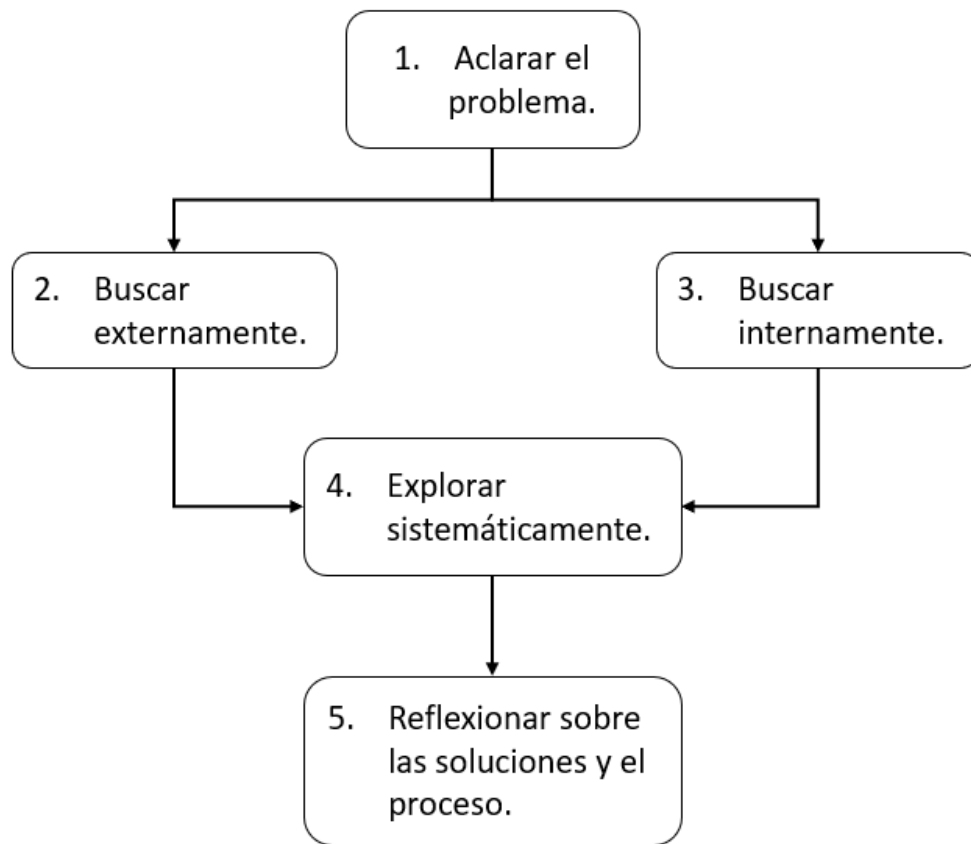


Figura 4.1. Método de generación de conceptos de cinco pasos. Adaptado de [1]

4.1.1. ACLARAR EL PROBLEMA

El primer paso busca desarrollar un entendimiento total de la función del robot móvil, descomponer el problema general en subproblemas y enfocarse en aquellos críticos. Las propiedades del terreno, la misión del robot móvil y algunas características preliminares darán el comienzo a la formación de conceptos.

Uno de los cuestionamientos principales alrededor del robot móvil, era cómo se iba a desplazar por el terreno, la solución se encontró en un sistema locomotor, el cual será tomado como uno de los sistemas vitales del robot móvil.

Para aclarar el problema se determinaron unos objetivos aspiracionales:

- Facilidad para transitar por el terreno donde se realiza el cultivo de la palma de aceite.
- Robot móvil autónomo.
- Baterías como fuente de energía.

Por otro lado, también se determinaron unas necesidades que debe de cumplir el robot móvil:

- Robot móvil con poca intervención humana.
- Peso relativamente bajo para no comprimir el terreno.
- Trabajo durante un periodo prolongado de tiempo.

Estas necesidades posteriormente se tradujeron en especificaciones objetivo, como se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Especificaciones objetivo preliminares del robot móvil

Núm.	Métrica	Valores	Unidad
1	Longitud máxima	3000	mm
2	Ancho máximo	2000	mm
3	Altura máxima	1300	mm
4	Número de ruedas	4	Cantidad
5	Peso sin componentes	600	kg
6	Autonomía	8	h
7	Velocidad máxima	3 – 4	km/h

Las especificaciones anteriores son preliminares porque aún no se ha seleccionado un concepto, no se han determinado los detalles de diseño y faltan parámetros por definir.

Después de aclarar el problema se identifica que el diseño del robot móvil analizándolo como un todo es complejo, por eso se procede a dividir el problema principal en subproblemas por medio de una descomposición funcional realizando los métodos de caja negra y caja de cristal.

4.2.1.1 Descomposición funcional

Para descomponer el problema principal en subproblemas más simples se utiliza la metodología conocida como “caja negra” [8]. La caja negra es un esquema que representa las funciones generales asociadas robot móvil, el cual contempla los procesos de transferencia de energía, componentes y señales de control.

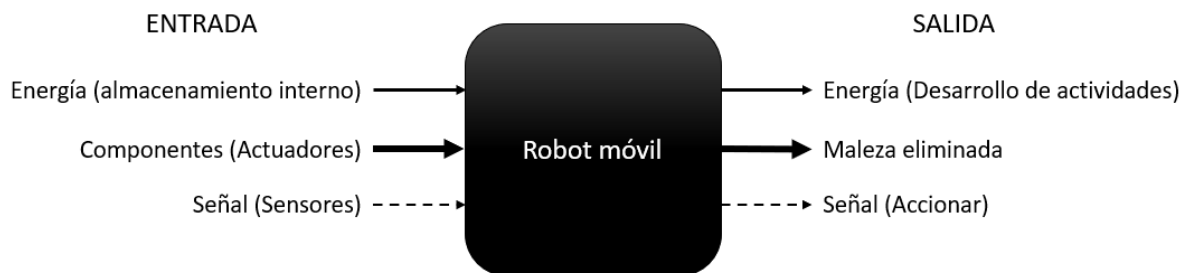


Figura 4.2. Descomposición funcional (caja negra).

A partir de la caja negra se procede a descomponer las funciones en subfunciones con el objetivo de generar descripciones más específicas. El resultado se muestra en la Figura 4.3, un diagrama funcional que contiene subfunciones.

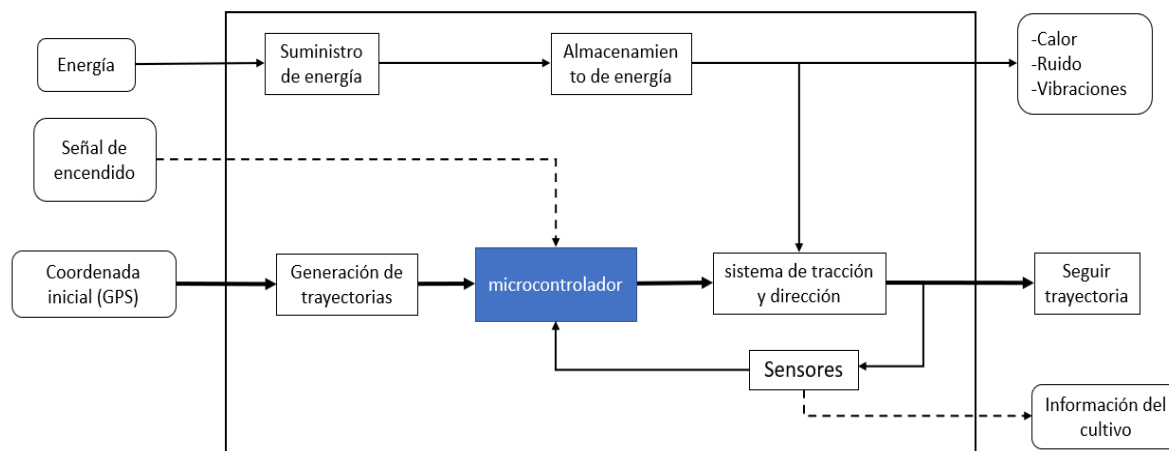


Figura 4.3. Diagrama funcional (caja de cristal).

Estas subfunciones se muestran de manera general sin incluir especificaciones técnicas de los sistemas a utilizar, esto con el objetivo de exponer una amplia gama de soluciones a los problemas que se presentan. Ya completado la descomposición del problema, se enfocará todos los esfuerzos en encontrar soluciones innovadoras y creativas para los sistemas más críticos.

4.1.2. BÚSQUEDA EXTERNA DE POSIBLES SOLUCIONES

El segundo paso es realizar una búsqueda externa, esto tiene como objetivo investigar sobre soluciones existentes al problema general y a los subproblemas presentados anteriormente. Se consultaron varias fuentes de información como son: literatura técnica, información en la web y un proceso de vigilancia estratégica, este último se realizó en el capítulo anterior.

A continuación, se muestran algunos productos encontrados:

- Naïo Technologies: Dino.

Dino es un robot móvil eléctrico diseñado para desmalezar de forma mecánica camas y filas de vegetales elevados. Su activo principal es el trabajo autónomo. El robot es diseñado por la compañía francesa Naïo Technologies y ha estado en el mercado desde principios de 2017 [22].



Figura 4.4. Dino de Naïo technologies. Tomado de [22]

- Ecorobotix: AVO.

AVO Es un robot móvil autónomo diseñado para desmalezar cultivos en hileras, prados y cultivos intercalados. Mediante el machine learning, el robot detecta y rocía selectivamente una microdosis de herbicida a las malezas. Desarrollado por Ecorobotix [23].



Figura 4.5. AVO de Ecorobotix. Tomado de [23]

4.1.3. BÚSQUEDA INTERNA DE POSIBLES SOLUCIONES

Como tercer paso se tiene la búsqueda interna, este apartado consiste en hacer uso del conocimiento personal, así como de la creatividad para generar conceptos de solución. Originar ideas factibles y no factibles, el uso de medios gráficos y físicos, realizar diversas actividades que estimule la creatividad hacen parte del desarrollo de esta tarea.

4.1.4. EXPLORAR SISTEMÁTICAMENTE

Como resultado de la búsqueda externa e interna, se obtuvo un gran volumen de información que dificulta el análisis y la generación de conceptos. El cuarto paso está destinado a filtrar, organizar y sintetizar esta información con el objetivo de encontrar las soluciones a los subproblemas planteados anteriormente.

Utilizando la metodología de cinco pasos de Ulrich, se realizan las dos herramientas específicas que él propone: el árbol de clasificación de conceptos y la tabla de combinación de conceptos [1].

A continuación se expone el árbol de clasificación y la tabla de combinación de conceptos para el robot móvil.

4.1.4.1. ÁRBOL DE CLASIFICACIÓN

El árbol de clasificación permite dividir los conceptos en categorías que facilitan la comparación y la eliminación de las soluciones. Se realizó la descomposición del robot móvil en los sistemas principales para poder crear los árboles de clasificación a cada subproblema.

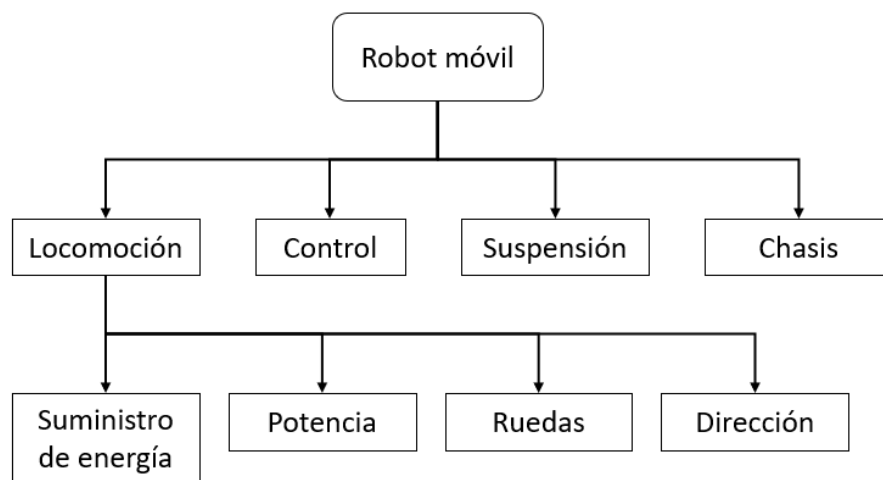
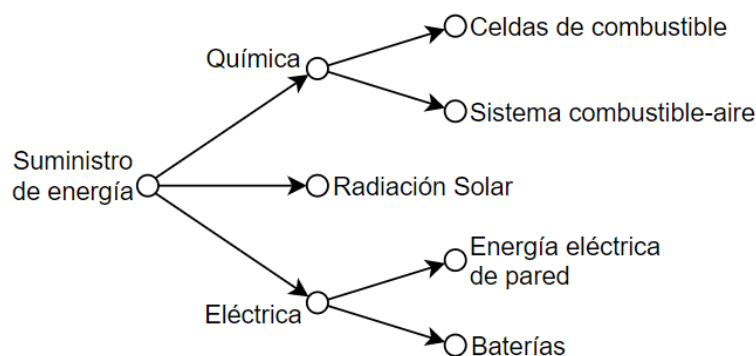
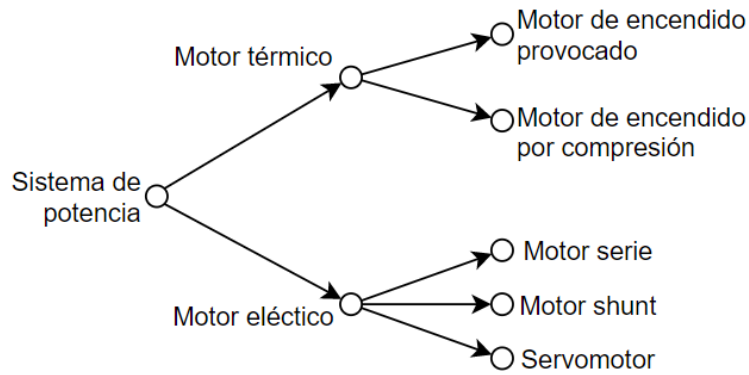


Figura 4.6. Descomposición del robot móvil

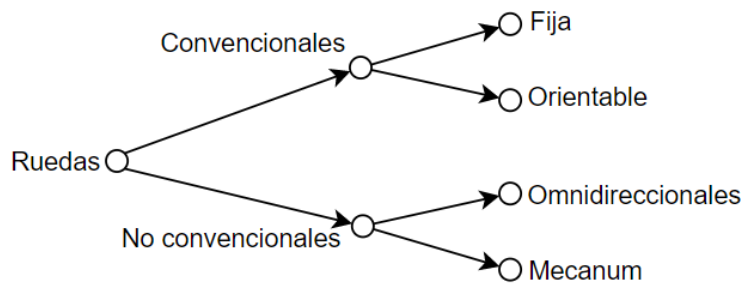
Los árboles de clasificación se presentan en las Figuras 4.7. Allí se muestran las posibles soluciones que se tuvo en cuenta para cada subproblema.



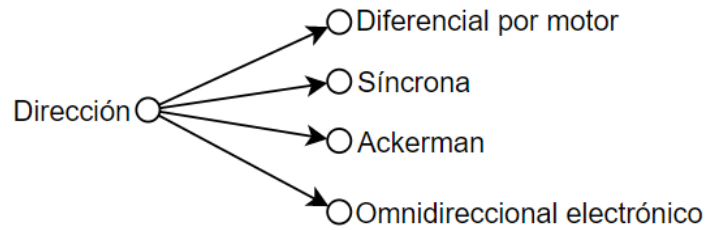
a) Suministro de energía



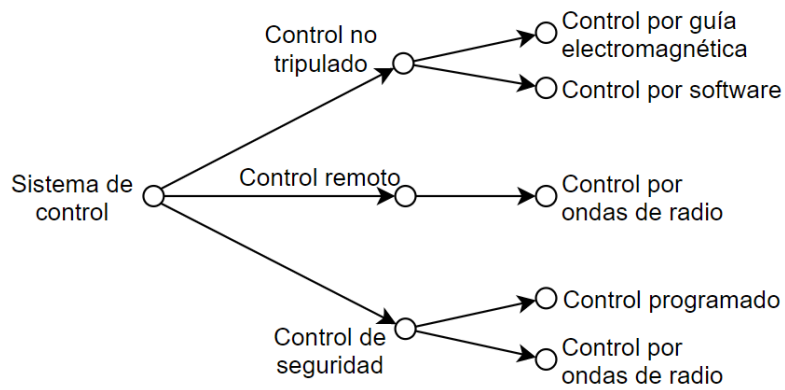
b) Sistema de potencia



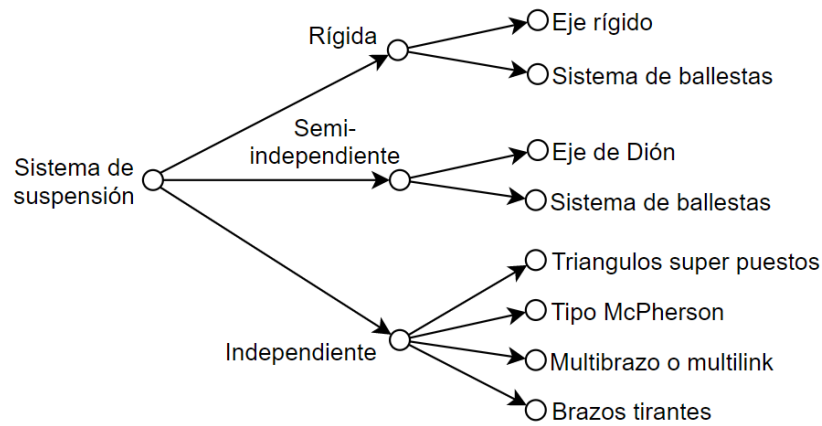
c) Ruedas



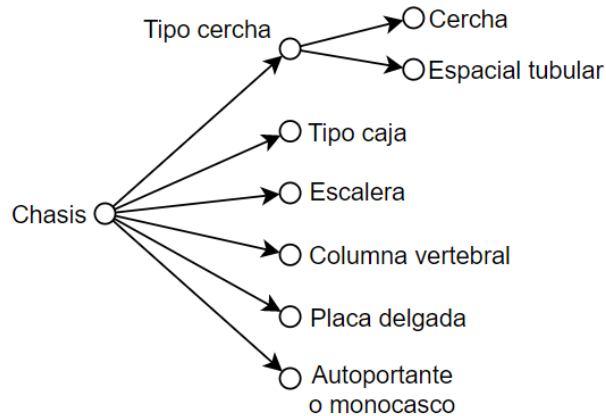
d) Sistema de dirección



e) Sistema de control



f) Sistema de suspensión



g) Chasis

Figura 4.7. Árboles de clasificación de los diferentes subproblemas.
Adaptado de [8]

4.1.4.2. TABLA DE COMBINACIÓN DE CONCEPTOS

Las tablas de combinación de conceptos ayudan a establecer las posibles soluciones de manera sistemática, éstas se forman al combinar fragmentos de cada columna, esta combinación debe de ser evaluada y desarrollada de manera creativa para obtener un resultado coherente y que lleve al buen funcionamiento del robot móvil.

Algunos sistemas del robot móvil no están representados en la tabla de clasificación debido que la solución más viable es obtenida directamente en el árbol de clasificación. Los sistemas seleccionados son:

- Suministro de energía: Se seleccionaron las baterías recargables por medio de paneles solares o con energía eléctrica de pared.
- Sistema de potencia: Se seleccionó el motor eléctrico debido a que éste es más amigable con el medio ambiente y no emite material particulado, por otro lado, los sistemas de potencia que utilizan motores térmicos son sistemas más complejos y requieren mayor espacio.
- Sistema de control: Se seleccionó control no tripulado por medio de software ya que este tipo de control requiere poca intervención humana.

En la Figura 4.8 se muestran las posibles combinaciones de los sistemas restantes.

Suspensión	Dirección	Ruedas	Chasis
Independiente	Diferencial	Convencionales fija	Tipo caja
Semi-independiente	Síncrona	Orientables	Tipo escalera
	Ackerman	Mecanum	Placa delgada
	Omnidireccional electrónico	Omnidireccionales	

Figura 4.8. Tabla de combinación de conceptos. Adaptado de [1]

Por medio de árboles de clasificación y tablas de combinación de conceptos se abarcan todas las posibles alternativas para los subproblemas propuestos. A continuación se presenta una posible combinación de conceptos para el robot móvil empleando la tabla de combinación.

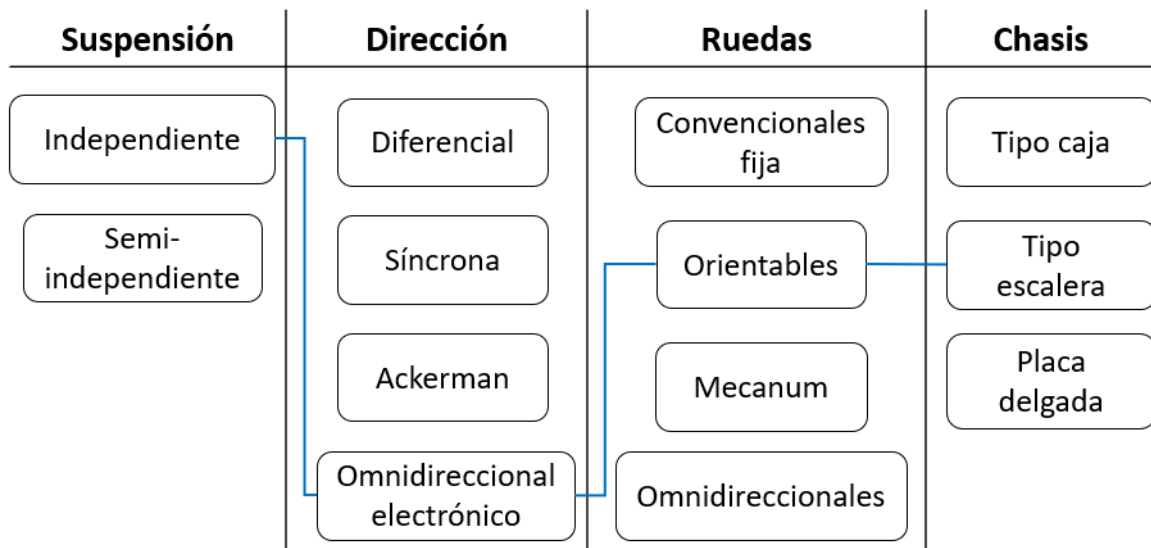


Figura 4.9. Posible combinación de conceptos para el robot móvil

4.1.5. GENERACIÓN DE CONCEPTOS

Para generar los conceptos se desarrolló un espacio de confianza donde se procesaron diferentes ideas para solucionar los diferentes tipos de problemas que fueron exploradas en su totalidad. Por medio de los diagramas funcionales se pudo descomponer el problema general en subproblemas y se realizaron árboles de clasificación para dichos subproblemas, además, se creó una tabla de conceptos para realizar la combinación de sistemas y obtener los diferentes conceptos.

En la Tabla 4.2 se observan los conceptos factibles, en el capítulo 5 se desarrolla un proceso de selección de dos fases para realizar la selección del concepto final.

Tabla 4.2. Posibles conceptos para el robot móvil. Desarrollado por medio de la tabla de conceptos

Concepto	Tracción	Ruedas		Dirección	Suspensión	Chasis
		Delanteras	Traseras			
Concepto 1	4X2 (FWD)	Fijas	Locas	Tracción diferencial	4 ruedas independientes	Tipo caja
Concepto 2	4X2 (RWD)	Orientables	Fijas	Ackerman	Independiente adelante y eje de Dirección atrás	Tipo escalera
Concepto 3	4X2 (RWD)	Orientables	Fijas	Independiente por motor	Independiente adelante y eje de Dirección atrás	Placa delgada

Continuación tabla 4.2.

Concepto 4	4X4	Orientables	Orientables	Omnidireccional 4 ruedas Independientes por motor	4 ruedas independientes	Placa delgada
Concepto 5	4X4	Orientables	Fijas	Ackerman	4 ruedas independientes	Tipo escalera
Concepto 6	4X4	Orientables	Fijas	Ackerman	Independiente adelante y eje de Dión atrás	Tipo caja
Concepto 7	4X4	Orientables	Orientables	Omnidireccional 4 ruedas Independientes por motor	4 ruedas independientes	Tipo escalera
Concepto 8	4X4	Orientables	Orientables	Ackerman adelante y atrás	4 ruedas independientes	Tipo escalera
Concepto 9	4X4	Orientables	Orientables	Ackerman adelante y atrás	Eje de Dión adelante y atrás	Tipo caja

Capítulo 5

Selección del concepto

La selección del concepto es el proceso que se utiliza para evaluar las propuestas generadas en las fases anteriores, comparando los puntos fuertes y relativamente débiles de cada configuración, seleccionando uno o más conceptos para su posterior investigación y desarrollo. Por medio de procesos de iteración que contienen criterios relacionados con las necesidades planteadas y la viabilidad del producto, las diferentes alternativas se van reduciendo hasta obtener el concepto más adecuado teniendo en cuenta los requerimientos iniciales.

5.1. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DEL CONCEPTO

Existen diferentes metodologías para la selección del concepto, las cuales varían según su efectividad, entre los cuales se encuentran: decisión externa, campeón del producto, intuición, votación múltiple, pros y contra, prototipo y prueba, matrices de decisión, entre otros.

Un método estructurado ofrece varios beneficios, uno de ellos es que el producto final está enfocado en satisfacer las necesidades consumidor final, el diseño es competitivo y documentación del proceso de decisión. Un proceso estructurado también ayuda a guiar el desarrollo del producto ofreciendo beneficios, reduciendo tiempos y pérdida de objetividad; asimismo ayuda al equipo de diseño a mejorar la

coordinación del proceso y a tomar decisiones efectivas con base en los criterios definidos en los objetivos del proyecto.

Para la selección del concepto se presenta una metodología de dos etapas, la primera etapa se denomina filtrado de conceptos y la segunda, evaluación de conceptos. Cada una se apoya en una matriz de decisiones que se utiliza para filtrar, ordenar y seleccionar los mejores conceptos. De esta forma se puede filtrar y evaluar diversos conceptos que se generaron en las etapas anteriores y ayuda a mejorar los diseños obtenidos. Estas dos fases siguen un procedimiento de seis pasos que conducen al equipo al seleccionar el concepto [8]:

1. Elaborar la matriz de selección.
2. Evaluar el concepto.
3. Ordenar los conceptos.
4. Combinar y mejorar los conceptos.
5. Seleccionar uno o más conceptos.
6. Reflexionar sobre los resultados y el proceso.

5.2. FILTRADO DE CONCEPTOS

El objetivo de esta fase es reducir la información o el número de conceptos creados en los capítulos anteriores y obtener conceptos mejorados de acuerdo con los requerimientos de la línea de ensamble.

5.2.1. PRIMERA MATRIZ DE SELECCIÓN

Como en el capítulo anterior se obtuvieron muchos conceptos, el primer paso es filtrar la información, para esto se elaboró una matriz de selección que tiene en cuenta las necesidades que debe de satisfacer el robot móvil. Esta matriz permite reducir rápidamente el número de conceptos y mejorarlos.

La tabla 5.1 contiene la información de cada concepto.

Tabla 5.1. Conceptos del robot móvil

Concepto	Ruedas		Dirección	Suspensión	Chasis
	Delanteras	Traseras			
Concepto 1	Fijas	Locas	Tracción diferencial	Independiente adelante y atrás	Tipo caja
Concepto 2	Orientables	Fijas	Ackerman	Independiente adelante y eje de Dirección atrás	Tipo escalera
Concepto 3	Orientables	Fijas	Independiente por motor	Independiente adelante y eje de Dirección atrás	Placa delgada
Concepto 4	Orientables	Orientables	Omnidireccional por motor	Independiente adelante y atrás	Placa delgada
Concepto 5	Orientables	Fijas	Ackerman	Independiente adelante y atrás	Tipo escalera
Concepto 6	Orientables	Fijas	Ackerman	Independiente adelante y eje de Dirección atrás	Tipo caja
Concepto 7	Orientables	Orientables	Omnidireccional por motor	Independiente adelante y atrás	Tipo escalera
Concepto 8	Orientables	Orientables	Ackerman adelante y atrás	Independiente adelante y atrás	Tipo escalera
Concepto 9	Orientables	Orientables	Ackerman adelante y atrás	Eje de Dirección adelante y atrás	Tipo caja

5.2.2. EVALUACIÓN DE LOS CONCEPTOS

El código para la evaluar los conceptos se muestra a continuación: (↑) excepcional, (–) normal, (↓) regular. Básicamente se coloca (↑) si el concepto cumple la necesidad de una forma excelente, (–) si lo cumple sin ninguna novedad y (↓) si no cumple o es regular. Estos códigos se ponen en cada celda de la matriz para evaluar los conceptos en cada criterio de selección. Cada concepto tendrá una calificación y se optarán por los conceptos que más se adecuen para un posterior desarrollo. Se recomienda evaluar cada concepto en un criterio antes de continuar con el próximo criterio.

La Tabla 5.2 muestra la matriz de selección. Los criterios de selección están basados en las necesidades que debe satisfacer el robot móvil, éstas aparecen en la columna izquierda y las columnas del lado derecho contienen las configuraciones a valorar.

Tabla 5.2. Primera matriz de selección

Criterios de selección		Conceptos								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Capacidad para almacenar componentes.	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2	Protección de los componentes contra el polvo y el agua.	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3	Fácil acceso a los componentes.	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4	Resistente contra golpes.	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↓
5	Larga vida útil.	–	–	–	–	–	–	–	–	–
6	Adaptable a mejoras.	–	–	–	–	–	–	–	–	–
7	Robusto pero funcional.	–	–	–	↑	–	↑	↑	↑	–
8	Ligero.	–	↓	↓	↑	–	↓	–	–	↓
9	Eficiencia energética / Ahorro energético.	↑	↑	↑	↓	–	–	↓	–	–
10	Trabajo continuo.	–	–	–	–	–	–	–	–	–
11	Vehículo autónomo.	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12	Recorrido en terreno con pendientes no mayores de 12°.	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
13	Recorrido en terreno heterogéneo.	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑
14	Flexibilidad en la trayectoria.	–	↓	–	↑	↓	↓	↑	–	–
15	Fácil acceso para mantenimiento.	–	–	–	↑	–	–	↑	↓	↓
16	Capacidad para reducir vibraciones.	↑	–	–	↑	↑	–	↑	↑	↓
Suma de ↑		3	3	2	7	4	3	7	5	2
Suma de –		11	10	11	7	11	10	8	10	10
Suma de ↓		2	3	3	2	1	3	1	1	4
Evaluación neta		1	0	-1	5	3	0	6	4	-2
Lugar		5	6	8	2	4	7	1	3	9
¿Continúa?		No	No	No	Sí	Revisar	No	Sí	Sí	No

5.2.3. ORDENAR LOS CONCEPTOS

Las filas inferiores de la matriz anterior muestran los resultados de la evaluación de cada concepto. Como se muestra en la Tabla 5.2 los conceptos que obtuvieron mejor puntuación fueron los conceptos 4, 5, 7 y 8. El mejor es el concepto 7, su configuración es: dirección omnidireccional por medio de motor, suspensión independiente y chasis tipo escalera; este concepto tuvo siete criterios “excepcionales”, ocho criterios “normales” y solo un criterio “regular”. Por otro lado,

la configuración con dirección omnidireccional por medio de motor, suspensión independiente y chasis de placa delgada (concepto 4) y la configuración con dirección Ackerman adelante y atrás, suspensión independiente y chasis tipo escalera (concepto 8) fueron la segunda y tercera con mejor puntuación respectivamente. Estos tres conceptos continúan en el proceso de selección y se realizará una descripción con más detalle. Cabe destacar que el concepto 5 que obtuvo la cuarta mejor puntuación se revisará con mayor profundidad para obtener un desarrollo viable. Las demás configuraciones no continúan en el proceso de selección.

A continuación se presentan los conceptos con su respectiva descripción:

Concepto 4: En la Figura 5.1 se observa una representación sencilla del primer diseño conceptual definido para el robot móvil, esta configuración consta de cuatro ruedas convencionales orientables, un chasis de placa delgada, suspensión independiente y un sistema de dirección omnidireccional por medio de motores. Esta configuración tiene la máxima maniobrabilidad en el plano; de acuerdo con la rotación de cada una de las ruedas el robot puede avanzar, girar o desplazarse lateralmente sin necesidad de reorientarse. Las ventajas del sistema omnidireccional se ven disminuidas por la complejidad electrónica necesaria para conservar una buena coordinación entre las ruedas y evitar desvíos en la postura del robot.

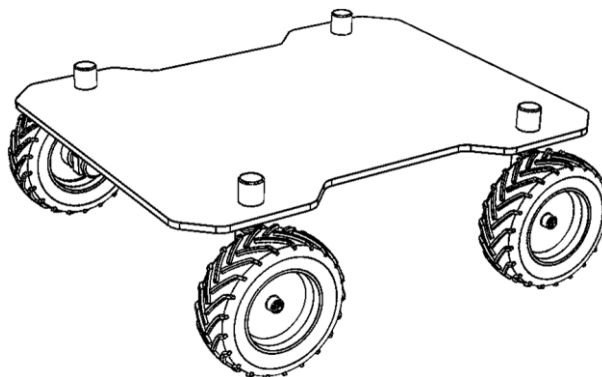


Figura 5.1. Boceto concepto 4

Concepto 7: Esta configuración es muy similar al concepto 4 difiriendo solamente en el tipo de chasis, esta configuración consta de cuatro ruedas convencionales orientables, una suspensión independiente, un sistema de dirección omnidireccional por medio de motores y un chasis tipo escalera, este chasis posee varias ventajas como lo son gran resistencia, alta durabilidad y en caso de accidente no sufre daños graves.

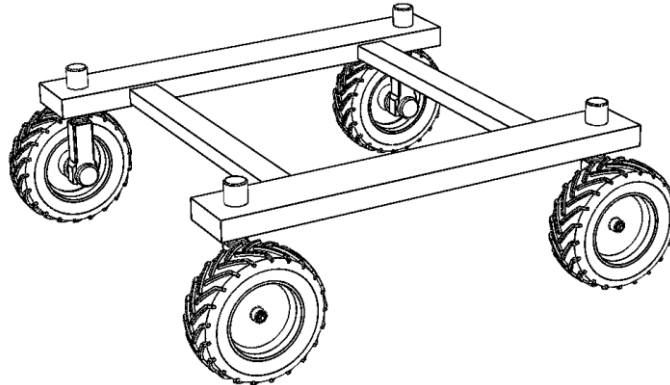


Figura 5.2. Boceto concepto 7

Concepto 8: Esta configuración consta de cuatro ruedas convencionales orientables, un chasis tipo escalera, suspensión independiente y un sistema de dirección Ackerman en los dos ejes. La principal ventaja de esta configuración es el sistema de dirección Ackerman en los dos ejes el cual es accionado por motores eléctricos, este sistema es utilizado con frecuencia en vehículos agrícolas y en cargadores (vehículo de carga pesada) y permite un radio de giro menor al de un sistema Ackerman normal.

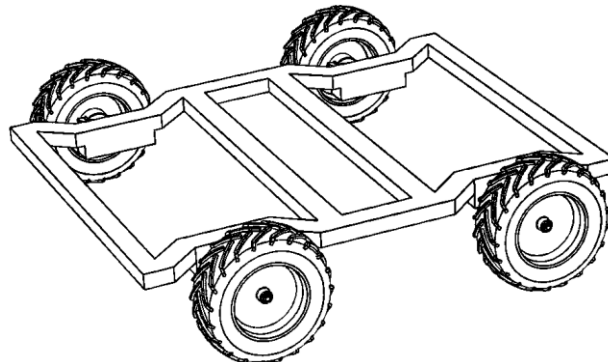


Figura 5.3. Boceto concepto 8

5.2.4. SEGUNDA MATRIZ DE SELECCIÓN

Cuando el proceso de selección indica que hay varios diseños potencialmente factibles, se debe de seleccionar el óptimo o el mejor disponible para realizar el diseño detallado. Para seleccionar el mejor concepto se desarrolló una segunda matriz de decisión, en ésta, las columnas corresponden a categorías con las cuales se pueden juzgar los diseños como lo son: costo, seguridad, funcionamiento confiabilidad y maniobrabilidad. A cada categoría se le asigna un factor de ponderación que mide su importancia relativa y el cuerpo de la matriz se llena con números que jerarquizan cada diseño en un rango de 1 a 10 en cada categoría. Las calificaciones se multiplican por el factor de ponderación y los productos se suman para cada diseño.

Tabla 5.3. Segunda matriz de selección

Concepto	Costo	Seguridad	Funcionamiento	Confiabilidad	Maniobrabilidad	Rango
Factor de ponderación	.20	.15	.15	.20	.30	1
CONCEPTO 4	5 1.0	5 0.75	8 1.2	7 1.4	10 3.0	7.35
CONCEPTO 7	4 0.8	6 0.9	8 1.2	9 1.8	10 3.0	7.70
CONCEPTO 8	7 1.4	5 0.75	7 1.0	8 1.6	7 2.1	6.85

La última columna de la matriz anterior muestra los resultados de la evaluación de cada concepto. Como se muestra en la Tabla 5.3 el concepto que obtuvo la mejor puntuación fue el concepto 7, su configuración es dirección omnidireccional por medio de motor, suspensión independiente y chasis tipo escalera. Por otro lado, el concepto 4 que tiene una configuración muy similar al concepto 7 y que solo difiere en el tipo de chasis fue la segunda con mejor puntuación, por ende, este concepto se podría investigar con mayor profundidad. El concepto 8 no se descarta para posibles combinaciones, aunque no se continúa su exploración.

5.2.5. COMBINAR Y MEJORAR LOS CONCEPTOS

Después de evaluar las matrices de selección se observa que se pueden mejorar algunas características del concepto más viable, para esto se combinan las cualidades de los tres conceptos con mejor calificación. Para los criterios de selección se tienen las siguientes observaciones:

- a) En la primera matriz, el concepto más viable obtuvo una calificación regular para la eficiencia energética, por lo que se recomienda generar estrategias para tener un menor consumo de energía como reducir el número de motores, ya que esta configuración utiliza cuatro motores para la generación de potencia y otros cuatro para poder dirigir las ruedas, otra estrategia sería utilizar materiales más livianos para disminuir el peso.
- b) En los criterios de capacidad para almacenar componentes, protección de los componentes contra el polvo y el agua y fácil acceso a los componentes en todos los conceptos se obtuvo una calificación normal. Estas categorías están vinculadas a la forma del chasis y la carrocería del robot móvil, por lo que se recomienda diseñar una carrocería que sea de fácil acceso a los componentes y que contenga buen espacio para los estos.
- c) En los criterios de trabajo continuo y vehículo autónomo se registró una calificación normal, por lo que se recomienda generar estrategias para tener un menor consumo de energía y la disminución de horas hombre que intervienen en el robot.
- d) En criterios como resistente contra golpes, robusto pero funcional, recorrido en terreno con pendientes no mayores de 12°, recorrido en terreno heterogéneo, flexibilidad en la trayectoria, fácil acceso para mantenimiento y capacidad para reducir vibraciones se presentó una calificación superior, por lo que no es necesario generar acciones de mejora.

5.2.6. SELECCIÓN DE UNO O MÁS CONCEPTOS

El concepto seleccionado es el concepto 7, este diseño posee dirección omnidireccional por medio de motor, suspensión independiente y chasis tipo escalera.

La configuración seleccionada se muestra en la Figura 5.4, las dimensiones cuentan con el espacio suficiente para almacenar los componentes y protegerlos en caso de accidente mientras el robot se desplaza por el campo. Se tuvo en cuenta las especificaciones objetivo preliminares del robot móvil para el dimensionamiento (ver tabla 4.1, capítulo 4).

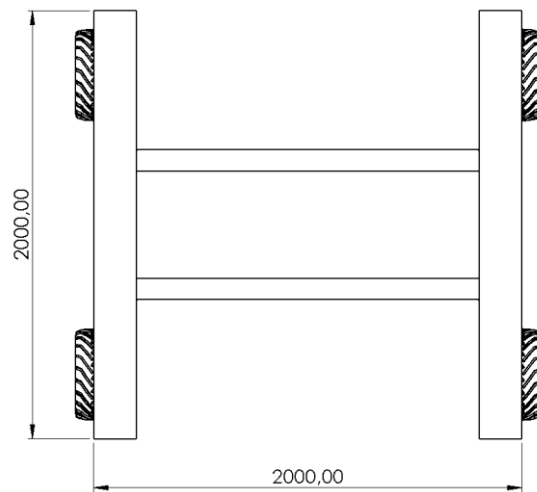


Figura 5.4. Vista superior del concepto final. Medidas en mm

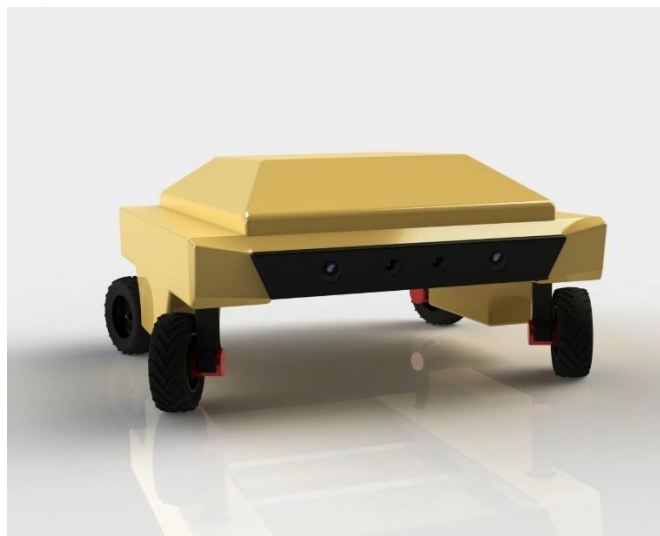


Figura 5.5. Render del concepto final

Conclusiones, aportes y recomendaciones

CONCLUSIONES

Se logró caracterizar el tipo de cultivo obteniendo información importante como lo son las características del terreno, las características climáticas y los distanciamientos de siembra. Este paso fue fundamental para poder identificar los requerimientos y la configuración del robot móvil.

Se definieron las especificaciones objetivo, las cuales fueron resultado de un procesamiento de datos técnicos o bien llamadas métricas. Estas métricas sirvieron para identificar y presentar una solución a las necesidades del robot móvil por medio de un lenguaje técnico. Para establecer las especificaciones objetivo, se consideró la información del cultivo, la vigilancia estratégica realizada e información recopilada de productos similares en el mercado.

Se crearon modelos conceptuales utilizando la metodología de cinco pasos propuesta por Ulrich la cual permitió una exploración completa del espacio de diseño y redujo la probabilidad de descuidar aspectos significativos en la solución de los conceptos considerados, descomponiendo un problema complejo en subproblemas más sencillos. Gracias a la metodología utilizada se logró obtener ideas y aportes significativos para solucionar problemas críticos como lo eran el sistema de dirección de dirección y el tipo de chasis. De este desarrollo se generaron tres alternativas viables para el robot móvil.

Se seleccionó el concepto 7 como la configuración más adecuada según las necesidades del terreno. Esta configuración posee una excelente maniobrabilidad por ser un robot omnidireccional, lo que le permite desplazarse por el campo sin inconvenientes, por otro lado; posee una suspensión independiente la cual permite el desplazamiento vertical una rueda sin afectar al resto de las ruedas, esto disminuye las oscilaciones del provocadas por el terreno mejorando la estabilidad al interior del robot. El chasis tipo escalera posee gran resistencia, alta durabilidad y en caso de accidente no sufre daños graves. Todas estas características definen el concepto como un diseño estable, resistente y maniobrable.

APORTES

El principal aporte de esta investigación es presentar la primera fase del proyecto que busca una alternativa al combate de malezas en el cultivo de la palma de aceite. Las fases siguientes para continuar el desarrollo e investigación del proyecto es el diseño de detalle, prototipado y pruebas del concepto final.

Este trabajo fomenta el desarrollo de investigaciones tecnológicas que incluyen robots móviles buscando siempre satisfacer una de las exigencias de la agricultura moderna: el manejo óptimo de grandes extensiones. Por medio de la vigilancia estratégica se tiene información actualizada del entorno industrial y académico con relación a los robots móviles enfocados en la agricultura de precisión.

Se presentó un conjunto de métodos para la conceptualización del diseño de un producto de forma clara y detallada, destinados a contribuir con la investigación de robots móviles que permitan simplificar operaciones en la agricultura.

Se obtuvieron diferentes alternativas para el combate de maleza en la palma de aceite, sin embargo, estas alternativas planteadas pueden ser aplicadas en otros cultivos con características similares.

RECOMENDACIONES

La vigilancia estratégica es un proceso que debe realizarse constantemente, por ende, se recomienda hacer una revisión periódica de: tecnologías emergentes, metodologías, técnicas innovadoras relacionadas con los robots móviles enfocados en la agricultura de precisión, ya que se pueden encontrar mejoras significativas mientras se avanza en el proyecto.

Es importante tener claro las palabras claves “*keywords*”, porque si no se tienen claras o no se tiene un vocabulario genérico se reduce el campo investigativo, debido a esto, es recomendable definir de manera adecuada las palabras claves cuando se realiza la búsqueda, esto aumentará las posibilidades de filtrar mejor la información.

El concepto seleccionado y las diferentes alternativas planteadas pueden ser un punto de partida para nuevas investigaciones por lo que se recomienda realizar un estudio para cada concepto que permita explorar más a fondo su configuración.

REFERENCIAS

- [1] ULRICH, Karl T., y EPPINGER, Steven D. Diseño y desarrollo de productos. 5ta edición. México D.F: McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A de C.V, 2012. 434 pp.
- [2] WILEY, John & AKOBUNDU, Sons. I.O. Weed Science in the Tropics-Principles and Practices, Nueva York. 1987. 522 pp.
- [3] ASTRÚA, Álvaro. Combate de malezas en palma aceitera. Disponible en: <https://cultivopalma.webcindario.com/combatemalezas.htm> Consultado el 14 de agosto de 2019.
- [4] MILTON, Alex, y RODGERS, Paul. Métodos de investigación para el diseño de producto. 1ra edición. Barcelona: Art Blume, S.L. 2013. 18 pp
- [5] GARCÍA Emiliano, FLEGO Fernando. Agricultura de precisión. Universidad de Palermo. Artículo científico. 2017.
- [6] FEDEPALMA. La palma de aceite en Colombia. Disponible en: <http://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos>. Consultado el 20 de febrero de 2020.
- [7] AGRONET. Min Agricultura. Estadísticas agropecuarias de la palma de aceite. Disponible en: <https://www.agronet.gov.co/estadistica>. Consultado 21 de febrero de 2020.
- [8] ARDILA J. Claudia P., ORDOÑEZ I. Diana C, MENDOZA S. Claudia J., PATERNINA P. Carmen R., Guía para el mejoramiento de las condiciones ergonómicas en actividades agrícolas. Universidad Manuela Beltrán, Bucaramanga-Santander. 2017.
- [9] RICHARDSON DL. La historia del mejoramiento genético de la palma aceitera en la compañía United Fruit en América. Asd Oil Palm Papers (11): 1-22. 1995.
- [10] SÁENZ M. Livio E., Cultivo de la palma aceitera. Guía técnica. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura (IICA). Managua. Nicaragua. 2006.

- [11] BASTIDAS P. Silvio, PEÑA R. Eduardo, REYES C. Rafael. Preguntas sobre la palma de aceite *Elaeis Guineensis* Jacq., Palma Nolí *Elaeis Oleifera* (Kunth) Cortés y los híbridos interespecíficos Nolí X palma de aceite (*E. oleifera* x *E. guineensis*). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Bogotá. 2013.
- [12] ALDANA. Rosa C., ALDANA Jorge A., CALVACHE G. Hugo, FRANCO Pedro N. Manual de plagas de la palma de aceite en Colombia. Cuarta edición. Centro de investigación en Palma de Aceite (CENIPALMA) Bogotá. 2012.
- [13] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (2017, 02 09). Control de malezas [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=3Pw1vrdfayc>
- [14] LABRADA R, CASELEY J.C., PARKER C. Manejo de Malezas para Países en Desarrollo. (Estudio FAO Producción y Protección Vegetal - 120). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 1996.
- [15] CHÁVEZ M. Francisco, RIVADENEIRA Julio. Manual de cultivo de palma aceitera (*Elaeis Guineensis* Jacq.): Para la zona noroccidental del Ecuador. Asociación Nacional de cultivadores de palma africana (ANCUPA) Quito. 2003.
- [16] BARKER, Allen V., CRAKER Lyle E. Inhibition of weed seed germination by microwaves. *Agron. J.* 83(2). 302-305. 1991.
- [17] FEDEPALMA. SENA. Guía de prácticas agrícolas en el cultivo de palma de aceite ya establecido. Disponible en: <http://www.palmasana.org/bigdata/fito/renovar/pdfwebguiabuensaspracticasadagricolas.pdf>. Consultado el 18 de marzo de 2020.
- [18] CENIPALMA. Sanidad: Enfermedades y plagas de la palma de aceite. Disponible en: <https://www.cenipalma.org/sanidad/>. Consultado el 17 de mayo de 2020.
- [19] OLLERO B. Aníbal. Robótica: Manipuladores y robots móviles. Marcombo Boixareu Editores. Barcelona. 2001. 474pp.
- [20] LOZANO P, Tomás. "Foreword: Mobile Robot and Robotics". *Autonomous Robot Vehicles*. Editores I.J. Cox y G.T. Wilfong. Springer-Verlag, 1990.

[21] SENA. Vigilancia tecnológica, herramientas y estrategias para innovar. Manual de aprendizaje. TecnoParque Colombia. Disponible en: http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/vigilancia_tecnologica.pdf

Consultado 21 de mayo de 2020.

[22] NAÏO TECHNOLOGIES. Página web oficial de la compañía: <https://www.naio-technologies.com>

[23] ECOROBOTIX. Página web oficial de la compañía: <https://www.ecorobotix.com>

ANEXO A

ENCUESTA PARA EL ROBOT MÓVIL ENFOCADO A LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN CAMPO ABIERTO

Para cada una de las siguientes necesidades del robot móvil, por favor indique en una escala de 1 a 5 qué tan importante es esa función para usted. Por favor use la siguiente escala (Marque con una X un solo cuadro):

1. La función es indeseable. No consideraría un producto con esta función.
2. La función no es importante, pero no me importaría tenerla.
3. Sería bueno tener esa función, pero no es necesaria.
4. La función es altamente deseable, pero consideraría un producto sin ella.
5. La función es de gran importancia. No consideraría un producto sin esta función.

Elemento	Necesidades	Escala de importancia				
		1	2	3	4	5
Chasis / Carrocería	Capacidad para almacenar componentes					
Chasis / Carrocería	Protección de los componentes contra el polvo					
Chasis / Carrocería	Protección de los componentes contra el agua					
Chasis / Carrocería	Fácil acceso a los componentes					
Chasis	Resistente contra golpes					
Chasis	Larga vida útil					
Chasis	Adaptable a mejoras					
Chasis	Robusto pero funcional					
Chasis	Ligero en peso					
Dirección	Flexibilidad en la trayectoria					
Dirección	Sistema sencillo pero funcional					
Fuente de energía	Eficiencia energética / Ahorro energético					
Fuente de energía	Vehículo autónomo					
Fuente de energía	Trabajo continuo					
Fuente de energía	Recorrido en terreno con pendientes no mayores de 12°					
Ruedas	Recorrido en terreno heterogéneo					
Ruedas	Poco desgaste					
Suspensión	Fácil acceso para mantenimiento					
Suspensión	Reducir vibraciones					
Suspensión	Sistema sencillo pero funcional					

¡Muchas gracias por su participación!